



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISIS KARAKTERISTIK ARUS INRUSH PADA
TRAFO 3 FASA AKIBAT PENGARUH RESIDUAL
FLUKS**

Yudha Rohman Setiadi
NRP 2213 106 032

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Ir. Arif Musthofa, MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

ANALYSIS OF INRUSH CURRENT CHARACTERISTICS TRANSFORMER 3-PHASE DUE TO THE EFFECT OF RESIDUAL FLUX

Yudha Rohman Setiadi
NRP 2213 106 032

Advisor
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Ir. Arif Musthofa, MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“ANALISIS KARAKTERISTIK ARUS INRUSH PADA TRAFO 3 FASA AKIBAT PENGARUH RESIDUAL FLUKS”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2017



Yudha Rohman Setiadi
NRP. 2213 106 032

ANALISIS KARAKTERISTIK ARUS INRUSH PADA TRAFO 3 FASA AKIBAT PENGARUH RESIDUAL FLUKS

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing 1



Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
NIP. 197007121998021001

Dosen Pembimbing 2



Ir. Arif Musthofa, MT.
NIP. 196608111992031004



ANALISIS KARAKTERISTIK ARUS INRUSH PADA TRAFO 3 FASA AKIBAT PENGARUH RESIDUAL FLUKS

Yudha Rohman Setiadi
2213106032

Dosen Pembimbing 1 : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

Dosen Pembimbing 2 : Ir. Arif Musthofa, MT.

ABSTRAK

Arus *inrush* merupakan arus transien yang terjadi ketika peralatan listrik yang menggunakan prinsip elektromagnetik melakukan starting. Kesalahan operasi rele proteksi, penurunan kekuatan isolasi merupakan beberapa dampak yang dapat diberikan oleh arus *inrush*. Maka diperlukan studi lebih lanjut tentang bagaimana karakteristik arus *inrush* untuk memahami bagaimana fenomena arus *inrush* sehingga dampak yang ditimbulkan oleh arus *inrush* dapat diminimalisir.

Pada Tugas Akhir ini dilakukan percobaan dengan mengambil data arus *inrush* transformator uji 3 fasa 3kVA tipe inti *core* konvensional, dengan metode pengukuran berbasis eksperimen. Pengujian pada transformator dilakukan pada kondisi transien, yakni saat *starting*, pada awalnya transformator dikondisikan memiliki *residual flux* dan diatur agar sudut penyalaan transformator berada dititik 0 derajat dan sudut penyalaan 90 derajat. Proses *energize transformator* dilakukan dengan metode skuensial atau bergantian dari ketiga tegangan fasanya.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa rasio kenaikan antara metode penyalaan secara skuensial dan metode non-skuensial, maka untuk mendapatkan nilai arus *inrush* terkecil saat melakukan *starting* transformator lebih baik menggunakan metode penyalaan 90 derajat secara skuensial. Sedangkan nilai arus *inrush peak* berbanding lurus dengan waktu demagnetisasi, jadi semakin lama waktu demagnetisasi pada transformator uji maka sisa fluks pada transformator semakin berkurang.

Kata kunci : Arus *Inrush*, Pengujian, Eksperimen, Transformator

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

ANALYSIS OF INRUSH CURRENT CHARACTERISTICS TRANSFORMER 3-PHASE DUE TO THE EFFECT OF RESIDUAL FLUX

Yudha Rohman Setiadi
2213106032

Lecture Counsellor 1 : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

Lecture Counsellor 2 : Ir. Arif Musthofa, MT.

ABSTRACT

Inrush current is a transient that occur whenever an electrical equipment which is using electromagnetic principle, on starting state. Fault operation on protection relay, degradation of insulation quality are some of impact that caused by inrush current. It is necessary for further studies about characteristic of inrush current to understand the phenomenon so the impacts that caused by inrush current can be reduced.

In this study research conducted an experiment by taking the data of inrush current transformer 3kVA 3-phase conventional core type based on measurement methods. The transformers test performed in transient state. Initially transformers had residual flux and regulated in order to get the firing angle of transformers in 0 degrees and 90 degrees. Transformers energize proses was conducted by sequential method or changed the three phase of voltage responsively.

The test results showed the increasing ratio sequential methods between non sequential, In order to get the smallest inrush current value in starting, transformers should regulate the firing angle in 90 degrees sequentially. While the peak inrush current value is proportional to the demagnetization time, the longest demagnetization time in transformer test then the residual flux in the transformer decrease.

Keywords : Inrush Current, Measurement, Experiment, Transformer

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayat-Nya. Shalawat dan salam selalu tercurahkan kepada rasulillah Muhammad SAW, keluarga tercinta, sahabat serta kita semua selaku umatnya. Alhamdulillah penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Analisis Karakteristik Arus Inrush Pada Trafo 3 Fasa Akibat Pengaruh Residual Fluks” tepat waktu.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak I Made Yulistya Negara, Bapak Arif Musthofa, atas segala pengetahuannya dan waktunya dalam membimbing penulis sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Orang tua dan saudara penulis yang tiada henti memberikan doa, nasehat, dan semangat kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.
3. Sahabat – sahabat karib di surabaya yang selalu memberikan semangat dan tidak bosan dalam mengingatkan penulis untuk segera menyelesaikan tugas akhirnya.
4. Semua anggota tim CV. BJT yang selalu memberikan 100% tenaganya untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
5. Teman – teman Kos E21 yang telah memberikan saya tempat yang saya sebut keluarga kedua selama dalam masa perkuliahan ini.
6. Putra dan Bagus yang selalu menemani dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini, baik kondisi hujan atau panas yang terik, esok atau malam hari, yang selalu ada ketika saling membutuhkan.
7. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Jurusan Teknik Elektro-FTI, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
8. Teman teman, sahabat lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini bermanfaat dan berguna bagi penulis khususnya dan juga bagi para pembaca pada umumnya.

Penulis,

Yudha Rohman Setiadi

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Sistematika Penulisan	2
BAB 2 TRANSFORMATOR DAN ARUS <i>INRUSH</i>	5
2.1 Transformator	5
2.1.1 Transformator Tiga Fasa	7
2.1.2 Histerisis Transformator	7
2.2 Arus <i>Inrush</i>	9
BAB 3 PERANCANGAN ALAT DEMAGTISASI	
TRANSFORMATOR 3 FASA	13
3.1 Perencanaan Alat	13
3.1.1 Panel Sumber Ac 3 Fasa	14
3.1.2 Komponen Pensakelaran	14
3.1.3 Transformator 3 Fasa	18
3.1.4 Kapasitor Demagnetisasi	19
3.2 <i>Digital Oscilloscope</i>	20
BAB 4 PENGUJIAN ALAT, AKUISISI DATA DAN ANALISA	23
4.1 Pengujian Alat	23
4.1.1 Kalibrasi Sudut Penyalaan	24
4.1.2 Kalibrasi Magnetisasi Transformator Uji	27
4.1.3 Pengujian Sakelar Demagnetisasi	27
4.2 Akuisisi Data	29
4.3 Hasil Pengujian	31
4.3.1 Hasil Pengujian 1	35
4.3.2 Hasil Pengujian 2	38
4.3.3 Hasil Pengujian 3	39
4.4 Analisa Data	53
4.4.1 Arus <i>Inrush</i> pada Sudut Penyalaan 0 derajat	53
4.4.2 Arus <i>Inrush</i> pada Sudut Penyalaan 90 derajat	56
BAB 5 PENUTUP	61
5.1 Kesimpulan	61
5.2 Penelitian Selanjutnya	61

DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN	65
RIWAYAT HIDUP PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Transformator tipe <i>corel</i>	5
Gambar 2.2	Transformator tipe <i>shell</i>	6
Gambar 2.3	Transformator 3 x 1 dan 1 x 3	
Gambar 2.4	Jalur loop histerisis yang dibentuk oleh fluks dalam inti besi ketika diberi arus bolak – balik	7
Gambar 2.5	Fenomena hubungan arus <i>inrush</i> akibat pengaruh fluks dan kurva magnetisasi inti	10
Gambar 3.1	Konsep sistem modul pengujian arus <i>inrush</i>	13
Gambar 3.2	Panel sumber AC 3 fasa	14
Gambar 3.3	Diagram blok komponen pensakelaran	14
Gambar 3.4	Rangkaian <i>zerro crossing</i>	15
Gambar 3.5	Sinyal keluaran <i>zerro crossing</i>	15
Gambar 3.6	Rangkaian kontrol Arduino	16
Gambar 3.7	Rangkaian <i>driver</i> dan <i>Triac</i>	17
Gambar 3.8	Simulasi pensakelaran TRIAC.....	18
Gambar 3.9	Transformator 3 kVA 3 fasa	18
Gambar 3.10	Kapasitor demagnetisasi	19
Gambar 3.11	Rangkaian kapasitor demagnetisasi dan sakelar pilih	20
Gambar 3.12	Digital osiloskop	20
Gambar 3.13	<i>Current Probe</i>	21
Gambar 3.14	<i>Probe</i> osiloskop	21
Gambar 4.1	Modul demagnetisasi transformator 3 fasa	23
Gambar 4.2	<i>Time delay zero crossing</i> dengan sumber tegangan AC	24
Gambar 4.3	Proses sinkronisasi modul arus <i>inrush</i> terhadap input tegangan jala-jala	25
Gambar 4.4	<i>Source code</i> kalibrasi waktu tunda sudut penyalan secara skuensial	25
Gambar 4.5	Kalibrasi sudut penyalan 0 derajat fasa L1 secara Skuensial	26
Gambar 4.6	Kalibrasi sudut penyalan 90 derajat fasa L1 secara skuensial	26
Gambar 4.7	Magnetisasi transformator uji pada fasa L1	27
Gambar 4.8	Sakelar pilih modul uji	28
Gambar 4.9	Menu waktu demagnetisasi modul uji	28
Gambar 4.10	Proses akusisi data pada transformator uji	30
Gambar 4.11	Pengujian arus <i>inrush peak</i> tanpa injeksi fluks	

	dengan sudut penyalan 0 derajat secara skuensial	31
Gambar 4.12	Pengujian arus <i>inrush peak</i> tanpa injeksi fluks dengan sudut penyalan 90 derajat secara skuensial	32
Gambar 4.13	Pengujian arus <i>inrush peak</i> tanpa injeksi fluks dengan sudut penyalan 0 derajat secara non-skuensial	33
Gambar 4.14	Pengujian arus <i>inrush peak</i> tanpa injeksi fluks dengan sudut penyalan 90 derajat secara non-skuensial	33
Gambar 4.15	Pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 1 untuk sudut penyalan 0 derajat secara skuensial	35
Gambar 4.16	Pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 1 untuk sudut penyalan 90 derajat secara skuensial	35
Gambar 4.17	Pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 1 untuk sudut penyalan 0 derajat secara non- skuensial	36
Gambar 4.18	Pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 1 untuk sudut penyalan 90 derajat secara non-skuensial	37
Gambar 4.19	Pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 2 untuk sudut penyalan 0 derajat secara skuensial	38
Gambar 4.20	Pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 2 untuk sudut penyalan 90 derajat secara skuensial	38
Gambar 4.21	Pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 3 untuk sudut penyalan 0 derajat secara skuensial	40
Gambar 4.22	Pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 3 untuk sudut penyalan 90 derajat secara skuensial	40
Gambar 4.23	Pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 3 untuk sudut penyalan 0 derajat secara non-skuensial	41
Gambar 4.24	Pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 3 untuk sudut penyalan 90 derajat secara non-skuensial	42
Gambar 4.25	Perbandingan rasio arus <i>inrush peak</i> dengan nilai arus nominal transformator uji (I_n) sudut penyalan 0 derajat	54
Gambar 4.26	Perbandingan rasio arus <i>inrush peak</i> dengan nilai arus rata – rata arus <i>inrush peak</i> tanpa residual fluks pada transformator uji (I_{inr}) sudut penyalan 0 derajat	54
Gambar 4.27	Perbandingan rasio arus <i>inrush peak</i> dengan nilai arus nominal transformator uji (I_n) sudut penyalan 0 derajat	56

Gambar 4.28 Perbandingan rasio arus *inrush peak* dengan nilai arus rata – rata arus *inrush peak* tanpa residual fluks pada transformator uji (I_{inr}) sudut penyalan 90 derajat 57

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Spesifikasi transformator 3 kVA 3 fasa	18
Tabel 3.1	Spesifikasi <i>digital oscilloscope</i>	20
Tabel 3.1	Spesifikasi <i>current probe</i>	21
Tabel 3.1	Spesifikasi <i>probe</i> osiloskop	22
Tabel 4.1	Pengujian arus <i>inrush</i> tanpa injeksi fluks sudut 0 derajat secara skuensial	32
Tabel 4.2	Pengujian arus <i>inrush</i> tanpa injeksi fluks sudut 90 derajat secara skuensial	32
Tabel 4.3	Pengujian arus <i>inrush</i> tanpa injeksi fluks sudut 0 derajat secara non-skuensial	34
Tabel 4.4	Pengujian arus <i>inrush</i> tanpa injeksi fluks sudut 90 derajat secara non-skuensial	34
Tabel 4.5	Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 1 sudut penyalan 0 derajat secara skuensial	43
Tabel 4.6	Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 1 sudut penyalan 90 derajat secara skuensial	44
Tabel 4.7	Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 1 sudut penyalan 0 derajat secara non- skuensial	45
Tabel 4.8	Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 1 sudut penyalan 90 derajat secara non- skuensial	46
Tabel 4.9	Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 2 sudut penyalan 0 derajat secara skuensial	47
Tabel 4.10	Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 2 sudut penyalan 90 derajat secara skuensial	48
Tabel 4.11	Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 3 sudut penyalan 0 derajat secara skuensial	49
Tabel 4.12	Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 3 sudut penyalan 90 derajat secara skuensial	50
Tabel 4.13	Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 3 sudut penyalan 0 derajat secara non- skuensial	51
Tabel 4.14	Hasil pengukuran arus <i>inrush</i> pengujian 3 sudut penyalan 90 derajat secara non- skuensial	52

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Yudha Rohman Setiadi lahir di Lamongan pada tanggal 02 Juli 1992. Anak pertama dari 2 bersaudara ini menempuh pendidikan dasar di SDN Sumbersari pada tahun 1998-2004, kemudian SMPN 1 Ngimbang pada tahun 2004-2007, dan lulus dari SMKN 2 Bojonegoro pada tahun 2010. Pada tahun 2010 juga, penulis diterima sebagai mahasiswa di jurusan D3-Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) dan setelah lulus pada tahun 2013 penulis melanjutkan lintas jalur ke S1 mengambil Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Selama perkuliahan penulis membangun usaha CV. Bersama Jaya Teknik (BJT) bareng dengan teman – teman. Penulis dapat di hubungi lewat nomer *handphone* 085749557274.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transformator merupakan salah satu peralatan utama dalam sistem tenaga, transformator memainkan peran penting dalam saluran transmisi dan distribusi. Proses *energize* transformator mengakibatkan perubahan fluks seketika pada inti transformator, dan perubahan fluks tersebut mengakibatkan timbulnya arus magnetisasi pada transformator. Besar nilai arus magnetisasi pada transformator bergantung pada besar kapasitas tranformator tersebut. Penyebab utama terjadinya arus *inrush* adalah saturasi inti magnet dan ada *residual fluks* pada transformator. Saturasi pada inti transformator disebabkan oleh perubahan tiba-tiba pada sistem tegangan akibat *switching transient*, sinkronisasi fasa generator, kesalahan eksternal dan pemulihan kesalahan [1]. Besarnya arus *inrush* dan fluks inti dapat mencapai nilai 2-3 kali nilai teoritis maksimum fluks puncak nominal [1].

Transformator memiliki tingkat kerentanan yang besar terhadap transien sebuah jaringan. Model simulasi yang digunakan untuk memprediksi perilaku transien tidak selalu memadai dikarenakan kurangnya data atau pengukuran secara langsung dan pengetahuan untuk analisis transient. Parameter yang di perhitungkan dalam pemodelan *inrush current transformator* adalah masukan arus, *switching*, impuls petir, serta induksi tegangan lebih dan harmonik. Untuk memprediksi besar elektromagnetik pada transformator, diperlukan proses perhitungan yang lengkap. Sebagian besar representasi analisa *single-phase* yang digunakan dari simulasi tersebut belum cukup menjelaskan perbedaan antara *phase* transformator dan perbedaan yang disebabkan oleh berbagai struktur inti besi. Selain itu analisa hysteresis pada pemodelan simulasi *inrush current* juga memerlukan perbaikan [1]. Hingga saat ini tidak ada bukti langsung yang menyatakan pengisian transformator dapat menyebabkan kegagalan akibat adanya arus *inrush* yang besar. Namun, kegagalan isolasi pada transformator daya yang sering dioperasikan pada kondisi tidak berbeban mendukung dugaan bahwa arus *inrush* memiliki efek yang berbahaya [2]. Masalah lain yang ditimbulkan pengisian transformator adalah interaksi harmonisa dengan komponen sistem lain yang menghasilkan fenomena tegangan lebih dan resonansi [3].

Pada riset ini dilakukan percobaan dengan mengambil data arus *inrush* transformator uji 3 fasa 3kVA tipe inti *core* konvensional yang ada pada Laboratorium Tegangan Tinggi Elektro ITS, dengan metode pengukuran berbasis eksperimen. Pengujian pada transformator dilakukan pada kondisi transien, yakni saat *starting*, pada awalnya transformator dikondisikan memiliki *residual flux* dan diatur agar sudut penyalaan transformator berada dititik 0 derajat dan sudut penyalaan 90 derajat. Proses *energize transformator* dilakukan dengan metode non-skuensial yang ketiga fasanya masuk secara bersamaan dan metode skuensial yang ketiga tegangan fasanya masuk secara urut. Jadi tegangan masuk dari L1 terlebih dahulu, 120 derajat kemudian tegangan L2 masuk, dan yang terakhir setelah 120 derajat tegangan L3 masuk ke fasa transformator.

Hasil analisa yang di dapat hanya dari data pengujian yang dilakukan, setelah analisa dan perbandingan data hasil pengukuran kedua sudut penyalaan dilaksanakan, di dapatkan karekteristik arus *inrush* transformator apabila terdapat *residual flux* didalamnya.

Selain itu, hasil penelitian juga dapat dijadikan sebagai referensi untuk penelitian berikutnya, diantaranya yaitu metode untuk memperkecil arus *inrush* saat terdapat pengaruh residual fluks, parameter analisa transient pada transformator, dan sebagai pertimbangan analisa harmonisa.

Adapun urutan kerja yang akan dilakukan dalam studi ini pertama-tama adalah studi literatur dan menentukan metode pengukuran. Kedua, setelah melakukan studi literatur dan menentukan model transformator uji, menyiapkan, merancang dan menguji modul peralatan untuk pengukuran transformator uji. Ketiga, setelah modul peralatan siap digunakan, dilakukan proses pengukuran untuk pengambilan data. Proses pengambilan data menggunakan instrument akuisisi data dan dilakukan secara real-time di laboratorium. Keempat, data yang didapatkan dari pengukuran di laboratorium diolah. Pada fase ini dapat diketahui dan dibandingkan karakteristik dari arus *inrush* transformator uji. Langkah terakhir yakni memberikan kesimpulan dan melakukan evaluasi terhadap data yang diperoleh.

1.2 Sistematika Penulisan

Studi riset ini terdiri dari beberapa bab penulisan, dimulai dari bab satu dibahas tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, metode, sistematika, dan relevansi dari penulisan.

Selanjutnya pada bab dua dibahas tentang teori transformator dan arus *inrush* yang digunakan dalam pengerjaan studi ini.

Pada bab tiga dibahas tentang perancangan modul peralatan pengukuran transformator uji untuk mengetahui karakteristik arus *inrush* transformator uji.

Selanjutnya pada bab empat dibahas tentang pengujian modul peralatan dan analisis data hasil pengujian.

Pada bab lima dibahas tentang kesimpulan dari studi yang dilakukan.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 2

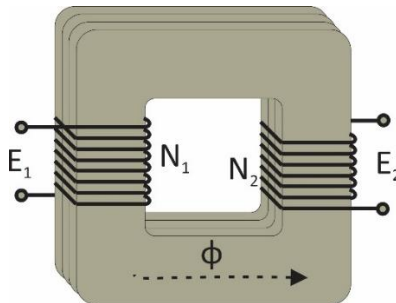
TRANSFORMATOR DAN ARUS *INRUSH*

2.1 Transformator

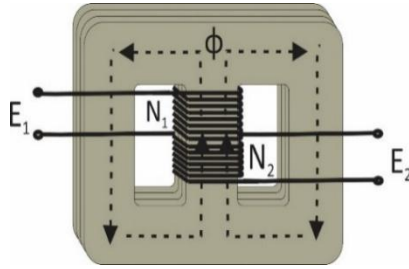
Transformator merupakan komponen yang sangat penting dalam sistem kelistrikan, secara umum trafo digunakan untuk menaikkan dan menurunkan tegangan. Transformator terdiri dari tiga bagian utama, yaitu kumparan primer, kumparan sekunder, dan inti besi transformator.

Prinsip kerja transformator adalah tegangan bolak-balik diberikan melalui kumparan primer. Kemudian akan mengalir arus bolak-balik pada masing-masing putaran kumparan. Arus bolak-balik tersebut akan menghasilkan fluks bolak-balik pada inti magnetik. Fluks tersebut mengalir pada inti transformator dan menginduksikan gaya gerak listrik (GGL) pada kumparan sekunder.

Pada dasarnya ada dua jenis transformator yang umum digunakan, yaitu tipe core dan tipe shell [4]. Pada transformator tipe core, kumparan primer dan kumparan sekunder berada pada sisi lengan transformator yang berbeda. Pada transformator tipe shell, kumparan primer dan kumparan sekunder berada pada sisi lengan transformator yang sama. Perbandingan antara kedua jenis tipe transformator ditunjukkan pada gambar 2.1 dan gambar 2.2.



Gambar 2.1 Transformator tipe *core*



Gambar 2.2 Transformator tipe *shell*

Dalam sebuah perhitungan transformator disebut sebagai transformator ideal, apabila pada transformator tersebut tidak ada rugi-rugi dan tidak ada fluks bocor. Sedangkan walaupun kecil, setiap belitan pada transformator pasti memiliki nilai hambatan. Hal tersebut yang menyebabkan transformator dapat menghasilkan fluks bocor. Fluks bocor merupakan fluks yang melalui udara di sekitar belitan. Fluks bocor yang dihasilkan oleh kumparan primer dan kumparan sekunder dapat menyebabkan timbulnya mutual fluks. Fluks tersebut tidak mengalir di udara, melainkan mengalir pada inti transformator.

Secara ringkas penurunan rumus transformator, apabila e_1 merupakan tegangan induksi pada kumparan primer (N_1) dan e_2 merupakan tegangan induksi yang terbangkit pada sisi kumparan sekunder (N_2). Ketika kumparan primer disuplai dengan sumber tegangan AC, pada inti transformator mengalir fluks (Φ) searah dengan aturan tangan kanan. Besarnya gaya gerak listrik pada kumparan primer dipengaruhi oleh banyaknya jumlah belitan dan fluks yang berubah terhadap waktu. Dapat ditulis sebagai berikut

$$e_1 = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

GGL yang terinduksi pada kumparan sekunder adalah

$$-e_2 = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

Apabila polaritas diabaikan, dan diasumsikan e_1 dan e_2 sama dengan tegangan terminal v_1 dan v_2 . Akan didapatkan :

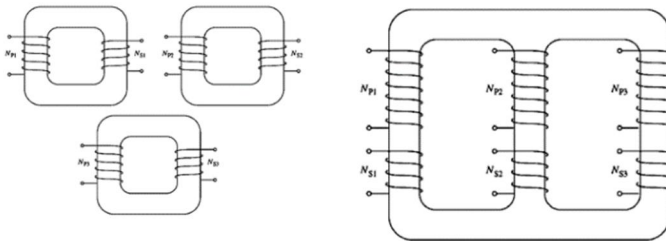
$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.3)$$

Dari rumus di atas dapat disimpulkan bahwa:

- Apabila $N_1 > N_2$, maka transformator tersebut menjadi *step-down transformer*.
- Apabila $N_1 < N_2$, maka transformator tersebut menjadi *step-up transformer*.

2.1.1 Transformator Tiga Fasa

Khusus untuk transformator 3 fasa, dapat disusun dengan 1 buah transformator 3 fasa (1 x 3) atau dengan 3 buah transformator 1 fasa (3 x 1). Kontruksi transformator 3 fasa dapat di lihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Transformator 3 x 1 dan 1 x 3

Transformator tiga fasa juga terdiri dari tipe *core* dan tipe *shell*. Belitan transformator tiga fasa dapat dihubungkan dengan koneksi wye (Y) dan delta (Δ). Sehingga koneksi antara kumparan primer dan kumparan sekunder, mempunyai empat kombinasi, yaitu: Koneksi Y- Δ ; Koneksi Y-Y; Koneksi Δ -Y; Koneksi Δ - Δ . Perbedaan fasa untuk setiap belitan pada transformator tiga fasa memiliki beda fasa sebesar 120 derajat.

2.1.2 Histerisis Transformator

Keterlambatan dari material magnetik disebut sebagai histerisis magnetik, yang berhubungan dengan karakteristik dari material. Kurva histeresis merupakan kurva yang membandingkan kerapatan fluks (B) dengan intensitas medan magnet (H). Kerapatan fluks merupakan jumlah aliran fluks per luasan lintasan. Secara matematis dapat dijabarkan sebagai berikut,

$$B = \mu H; B = \frac{\phi}{A} \quad (2.4)$$

dimana H adalah intensitas medan magnet atau gaya magnetisasi, dan A adalah luas permukaan dari inti ferromagnetik. Untuk mendapatkan nilai H , diperoleh dari rumus,

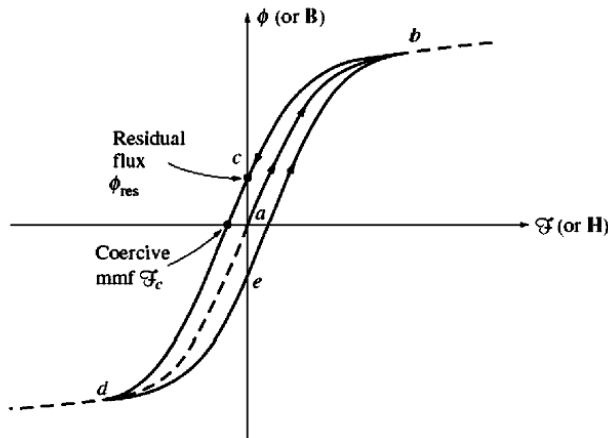
$$H = i \frac{l}{l} \quad (2.5)$$

dimana l merupakan panjang jalur magnetik dari suatu inti transformator. Sehingga,

$$\phi = \int B \cdot dS = A\mu \frac{iT_1}{l} \quad (2.6)$$

Saat transformator di-energize dan mencapai kondisi saturasi pada inti, kemudian transformator dimatikan, maka tetap terdapat fluks sisa yang masih berada didalam inti. Hal tersebut dipengaruhi oleh retentivitas.

Retentivitas merupakan kemampuan material untuk mempertahankan sebagian dari magnet yang mengalir pada inti setelah proses magnetisasi berhenti.



Gambar 2.4 Jalur *loop* histerisis yang dibentuk oleh fluks dalam inti besi ketika diberi arus bolak - balik

Ketika transformator diberi sumber bolak – balik dengan mengasumsikan fluks awalnya adalah nol, saat arus naik untuk pertama kalinya, fluks pada inti membentuk jalur a-b yang dapat dilihat pada gambar 2.4 dan ketika arus turun, fluks membentuk jalur b-c-d. Kemudian ketika arus naik lagi, terbentuk fluks dengan jalur d-e-b. Perlu diketahui bahwa jumlah fluks yang ada pada inti tidak tergantung pada jumlah arus yang diberikan pada kumparan inti, tetapi juga pada fluks sebelumnya, yang ada didalam inti.

Peningkatan pada arus yang memiliki arah berlawanan menyebabkan inti termagnetisasi pada arah berlawanan. Peningkatan ini akan menyebabkan inti mencapai saturasi namun pada arah berlawanan.

Perlu diketahui bahwa gaya magnet yang besar ketika pertama kali diberikan dan kemudian dihilangkan, fluks pada inti tidak menuju nol. Terdapat medan magnet yang tertinggal pada inti besi, dan inilah yang dinamakan residual fluks.

2.2 Arus *Inrush*

Arus *inrush* merupakan arus transien yang terjadi ketika peralatan yang menggunakan prinsip elektromagnetik melakukan *starting*, seperti transformator, motor, dll. Arus *inrush* memiliki magnitudo yang besar, dan spektrum harmonisa yang luas. Arus *inrush* bisa menyebabkan terjadinya kesalahan operasi pada rele-rele pengaman, mengurangi usia peralatan dan mengurangi kualitas daya sistem.

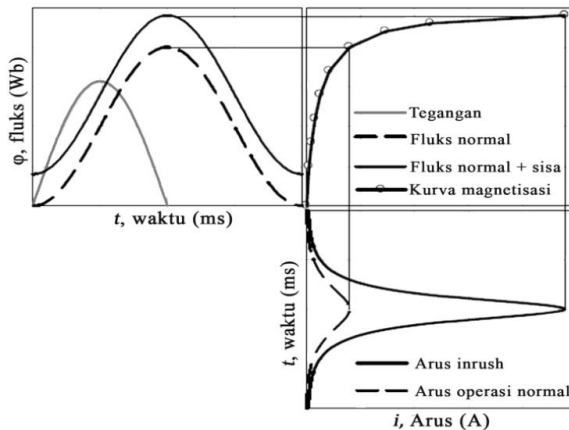
Saturasi pada inti magnet sebuah transformator menjadi penyebab utama terjadinya arus *inrush*. Saturasi pada inti disebabkan oleh perubahan tiba-tiba pada sistem tegangan akibat *switching transient*, sinkronisasi fasa generator, kesalahan eksternal dan pemulihan kesalahan [1]. Hasil pengisian transformator pada kebanyakan kasus arus *inrush* dan fluks inti dapat mencapai nilai 2-3 kali nilai teoritis maksimum fluks puncak nominal [1].

Ada 2 metode pengukuran arus *inrush* pada transformator yang saat ini telah dikembangkan, yakni metode simulasi arus *inrush* dan metode perhitungan analisis arus *inrush*. Pada metode simulasi arus *inrush*, pemodelan transformator menggunakan software seperti *EMTP (ElectroMagnetic Transient Program)* dengan berbagai metode untuk pemodelannya, seperti; *Newton-Raphson*; *Backward Differential Formulas (BDF)*; dan *Finite Element Method (FEM)*. Pada metode

perhitungan analisis arus *inrush*, analisis didapatkan melalui menurunkan teori transformator 1 fasa. Ada beberapa formula yang diusulkan, yakni; formula *Bertagnolli* [6]; *Specht* [7]; dan *Holcomb* [8].

Secara teori, arus *inrush* memiliki magnitudo maksimum pada saat dinyalakan dengan sudut penyalaan 0 derajat dan memiliki magnitudo minimum pada saat dinyalakan dengan sudut penyalaan 90 derajat [1].

Ketika transformator di-*energize* menggunakan sumber AC, maka muncul aliran arus magnetisasi yang melewati belitan yang terhubung oleh sumber tegangan, meskipun belitan disisi lain tidak terhubung. Arus *inrush* dibutuhkan untuk energisasi pada transformator sehingga menghasilkan fluks pada inti.



Gambar 2.5 Fenomena hubungan arus *inrush* akibat pengaruh fluks dan kurva magnetisasi inti

Arus *inrush* dipengaruhi oleh 2 faktor, yakni faktor internal dan eksternal. Pada faktor internal, arus *inrush* dipengaruhi oleh karakteristik dari material inti. Setiap material inti transformator memiliki kurva saturasi dan kurva histeresis yang berbeda sesuai dengan karakteristik material. Pada faktor eksternal, arus *inrush* dipengaruhi oleh fluks residu atau fluks sisa pada inti transformator. Arus *inrush* dibagi menjadi 2 bagian, yakni arus magnetisasi, arus yang diperlukan untuk menghasilkan fluks pada inti transformator, dan arus rugi inti, arus yang diperlukan

untuk rugi histerisis dan rugi arus *eddy*. Fenomena hubungan arus *inrush* akibat adanya pengaruh fluks dan kurva magnetisasi inti ditunjukkan pada gambar 2.5.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

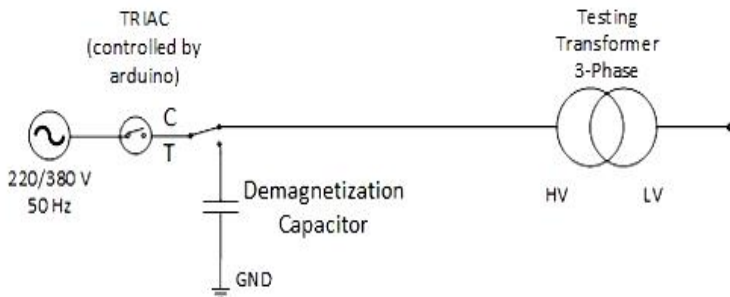
BAB 3

PERANCANGAN ALAT DEMAGTISASI TRANSFORMATOR 3 FASA

Desain perancangan dan implementasi modul demagnetisasi transformator 3 fasa untuk mengetahui karakteristik arus *inrush* akibat adanya *residual fluks* dengan metode penyalan non-skuensial dan skuensial dibahas secara menyeluruh pada bab 3, dalam satu modul uji di desain untuk mempunyai tiga jenis menu utama, di antaranya menu untuk menghitung waktu magnetisasi yang dapat mengondisikan *cut off* saat magnetisasi positif, pengaturan atau pemilihan sudut penyalan transformator, dan proses penghitung waktu demagnetisasi *residual fluks*. Untuk data pengamatan arus *inrush* transformator secara akurat dilihat melalui bantuan osiloskop.

3.1 Perencanaan Alat

Konsep utama rangkaian modul pengujian arus *inrush* yang digunakan ditunjukkan pada gambar 3.1.

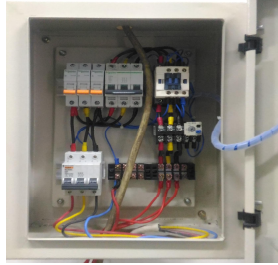


Gambar 3.1 Konsep sistem modul pengujian arus *inrush*

Dalam sistem yang digunakan, terdapat 7 komponen secara garis besar, yakni sumber AC 3 fasa 220/380 Volt, *fuse 60 Ampere*, rangkaian *zero crossing*, rangkaian pensakelaran *driver TRIAC*, rangkaian kontrol arduino nano, sakelar pilih dan *Shunt Capacitor*. Sistem secara detail dapat dilihat pada lampiran 1. Pilihan menu magnetisasi, sudut penyalan dan demagnetisasi dapat dilihat pada LCD modul dan pemilihan menu

dapat dilakukan dari menekan *push button* yang ada pada modul kontroler arduino.

3.1.1 Panel Sumber AC 3 Fasa

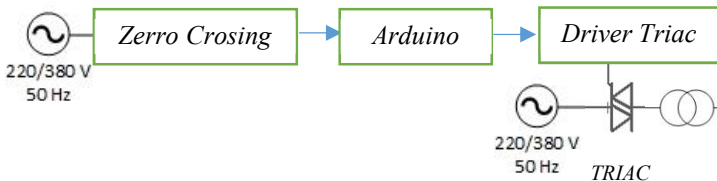


Gambar 3.2 Panel sumber AC 3 fasa

Transformator disuplai dari panel sumber AC 3 fasa 220/380 V 50 Hz, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2. Sumber AC 3 fasa ini diambil dari line PLN yang ada di dalam laboratorium Tegangan Tinggi Elektro ITS.

3.1.2 Komponen Pensakelaran

Proses pensakelaran dilakukan dari pembacaan sinyal *zero crossing*, kemudian diolah lebih lanjut oleh arduino, sehingga *time delay* sinyal pemicu aktifnya *Triac* dapat di kontrol menjadi sudut penyalan 0 derajat atau 90 derajat, serta tahanan *energize transformator* juga dapat di atur secara skuensial.

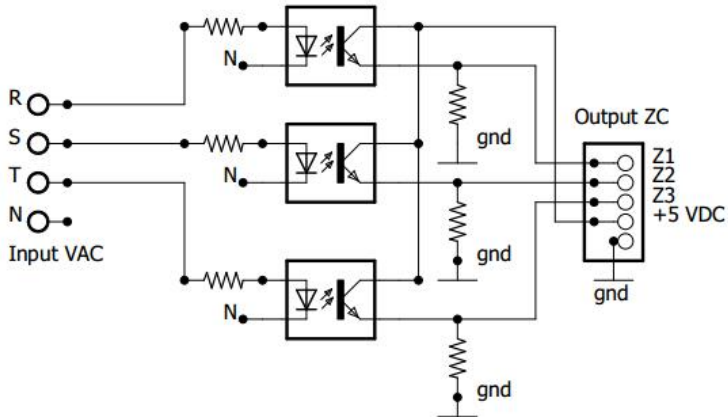


Gambar 3.3 Diagram blok komponen pensakelaran

Dari gambar 3.3 dapat diamati bahwa komponen pensaklaran dibagi menjadi 3, yakni :

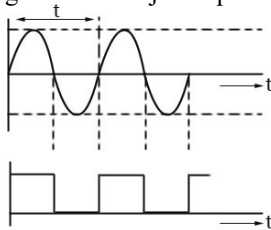
1. Rangkaian *zero crossing*

Rangkaian berfungsi untuk mendeteksi titik persimpangan nol dari input sistem. Rangkaian utama terdiri dari optocoupler PC817 dan resistor, rangkaian *zero crossing* ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Rangkaian *zero crossing*

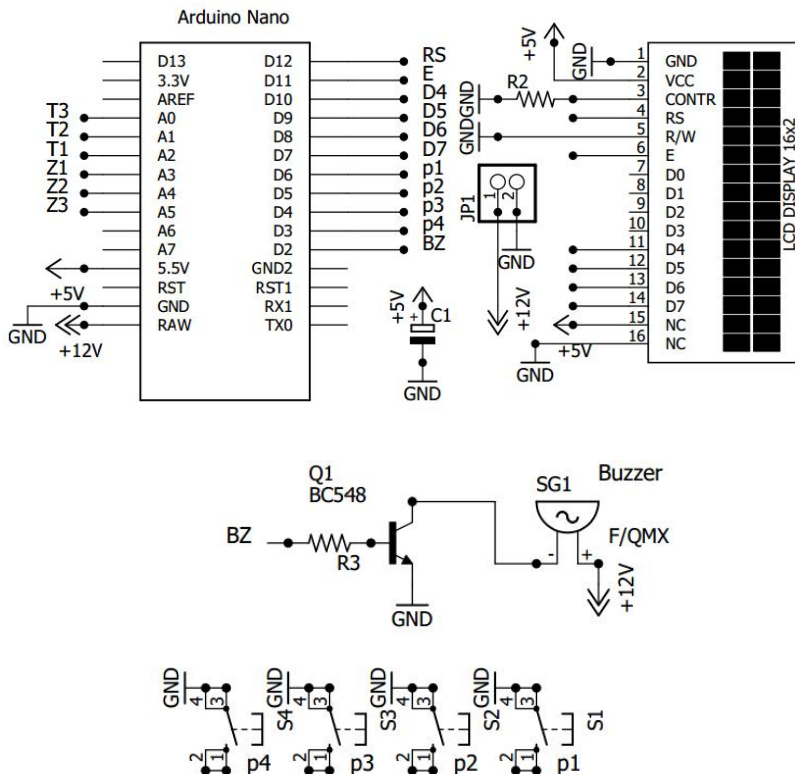
Proses pendeteksian titik persimpangan nol terjadi saat tegangan AC dalam keadaan positif dengan tegangan 1.2 Volt dan arus sebesar 11mA menyalakan LED *optocoupler*, sehingga mengakibatkan sinyal keluaran *zero crossing* berlogika *high* (5 Volt DC), sedangkan saat tegangan AC dalam keadaan negatif maka LED *optocoupler* tidak akan menyala dan keluaran *zero crossing* berlogika *low* (0 Volt DC). Sinyal keluaran rangkaian ditunjukkan pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Sinyal keluaran *zero crossing*

2. Rangkaian kontrol Arduino

Dalam modul pengujian arus *inrush* ini, Arduino Nano melakukan berbagai peran sebagai pengolah data, ketiga menu utama yang di tampilkan pada LCD adalah hasil olahan data pada Arduino. Pada pensakelaran, Arduino berfungsi sebagai pengatur *delay time*. Arduino diprogram untuk melakukan fungsi *latch* setelah *delay time* tertentu. Dengan kata lain, Arduino digunakan untuk mengatur sudut penyalan input dari sistem ke transformator uji. *Source code* Arduino untuk semua sistem dapat di lihat pada lampiran 2.

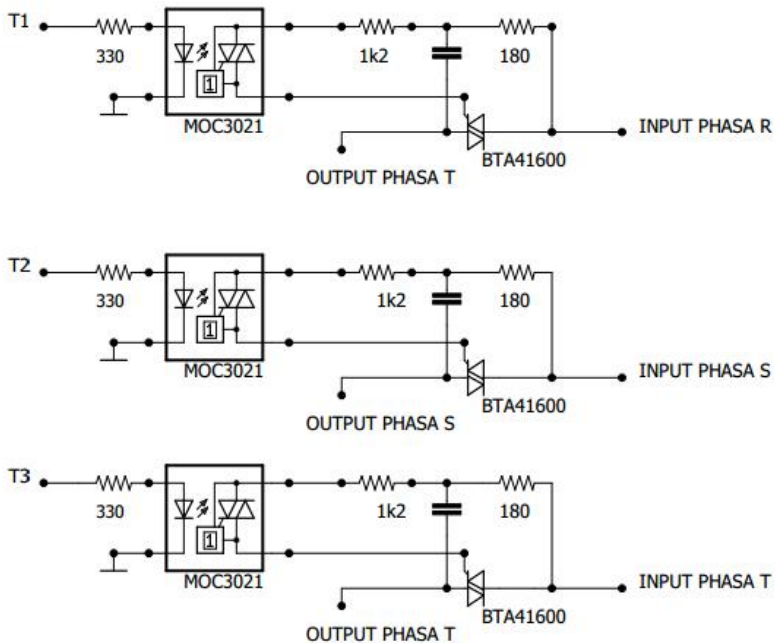


Gambar 3.6 Rangkaian kontrol Arduino

Pada gambar 3.6 dapat dilihat rangkaian kontrol Arduino yang terdiri dari beberapa komponen utama seperti LCD 2x16 sebagai tempat menampilkan menu pilihan yang terdapat pada modul, *buzzer* sebagai indikator suara ketika waktu magnetisasi atau demagnetisasi telah berakhir, dan 4 *push button* sebagai tombol untuk memilih menu pada modul.

3. Rangkaian *driver* dan *Triac*

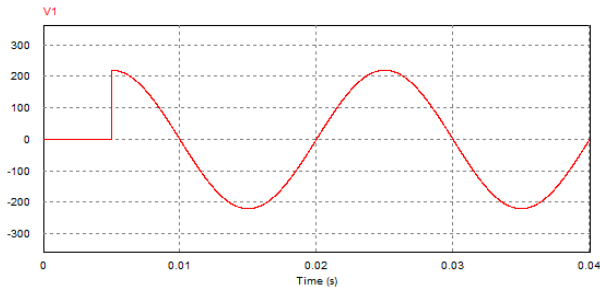
Rangkaian driver berfungsi sebagai trigger TRIAC *BTA41600B 40A* setelah mendapat umpan dari Arduino. Rangkaian ini terdiri dari resistor dan *Optocoupler MOC3021* yang bertugas men-trigger gate TRIAC setelah mendapat sinyal pemicu dari Arduino, serta rangkaian snubber yang terdiri dari resistor 180 Ohm, 1,2 kilo Ohm dan sebuah kapasitor 0,22 uF 275 VAC, berfungsi untuk melindungi *optocouler* dari interferensi perubahan polaritas sinyal.



Gambar 3.7 Rangkaian *driver* dan *Triac*

Setelah mendapatkan masukan pada gate dari optocoupler, kondisi *off* TRIAC berubah ke kondisi *forward* sehingga tegangan sumber AC dapat mengalir ke transformator uji. Gambar 3.7 merupakan *driver* TRIAC yang dipasang pada modul arus *inrush*.

Hasil simulasi pensakelaran TRIAC sudut penyalaaan 90 derajat di setengah priode awal, pada software PSIM di tunjukan pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Simulasi pensakelaran TRIAC

3.1.3 Transformator 3 Fasa

Transformator uji yang di pakai dalam studi riset ini adalah transformator 3 kVA 3 fasa merk SAE yang dihubungkan dalam bentuk Y-Y. Transformator uji ditunjukan pada gambar 3.9.



Gambar 3.9 Transformator 3 kVA 3 fasa

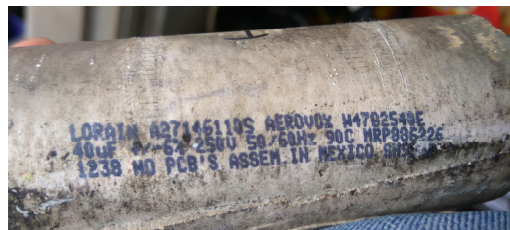
Transformator uji diatas memiliki inti standar. Secara lengkap spesifikasi dari transformator yang digunakan dalam studi ini ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi transformator 3 kVA 3 fasa

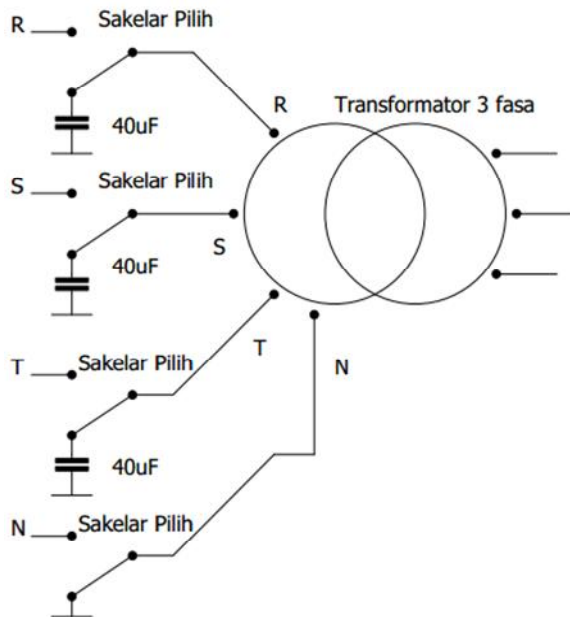
Fasa	3 Fasa
Daya Pada Trafo	3 KVA
Tegangan Primer	220 V
Tegangan Sekunder	127 V
Belitan Primer	340
Belitan Sekunder	196
Hubungan Belitan	Y / Y
Frekuensi	50 Hz

3.1.4 Kapasitor Demagnetisasi

Pada modul peralatan ini dipasang *shunt capacitor* yang memiliki fungsi demagnetisasi fluks yang ada di dalam transformator uji. 3 buah kapasitor 40uF, seperti pada gambar 3.11 dipasang secara paralel terhadap sistem yang dikendalikan oleh saklar manual. Saklar dinyalakan ketika sistem dalam kondisi mati, setelah proses pengukuran transformator. Saklar dinyalakan dalam waktu tertentu untuk proses demagnetisasi transformator uji. Gambar kapasitor demagnetisasi ditunjukkan pada gambar 3.10.



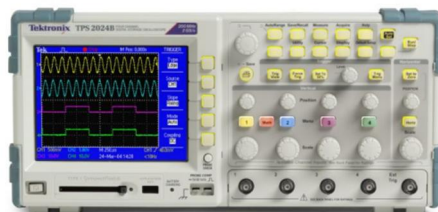
Gambar 3.10 Kapasitor demagnetisasi



Gambar 3.11 Rangkaian kapasitor demagnetisasi dan sakelar pilih

3.2 *Digital Oscilloscope*

Osiloskop ini digunakan untuk mengamati dan menangkap (akuisisi data) sinyal tegangan dan arus dari transformator uji untuk kemudian diolah dan dianalisa. Osiloskop digital yang digunakan pada proses akuisisi data ditunjukkan pada gambar 3.12.



Gambar 3.12 Digital osiloskop

Tabel 3.2 dibawah ini melampirkan beberapa spesifikasi dari digital osiloskop.

Tabel 3.2 Spesifikasi *digital oscilloscope*

<i>Bandwidth</i>	100 MHz
<i>Channel</i>	4
<i>Sample rate</i>	2 GSa/s
<i>Maximum Input Voltage</i>	600 V_{RMS} , CAT II
<i>Vertical Sensitivity</i>	2 mV - 5 V/div
<i>Time Base Range</i>	2 ns/div – 50 s/div

Probe yang digunakan pada osiloskop ada 4 buah, yakni 1 buah *probe* tegangan dan 3 buah *current probe*. Pada yang di tunjukan pada gambar 3.13 dan gambar 3.14 merupakan jenis *probe* yang digunakan pada proses akuisisi data menggunakan osiloskop.



Gambar 3.13 *Current Probe*



Gambar 3.14 *Probe osiloskop*

Pada tabel 3.3 dan 3.4 dibawah ini memaparkan beberapa spesifikasi utama dari *probe* yang digunakan pada osiloskop.

Tabel 3.3 Spesifikasi *current probe*

<i>Frequency</i>	DC to 100 kHz
<i>Maximum input current</i>	100 A peak
<i>Output</i>	10 mV/A, 100 mV/A
<i>Maximum bare-wire voltage</i>	600 V (CAT III)

Tabel 3.4 Spesifikasi *probe* osiloskop

<i>Bandwidth</i>	17/150 MHz
<i>Attenuation</i>	X1/X10
<i>Cable length</i>	47" (1.2m)
<i>Maximum Input Voltage</i>	300 V CAT II

BAB 4

PENGUJIAN ALAT, AKUISISI DATA DAN ANALISA

Pembahasan modul demagnetisasi transformator 3 fasa untuk mengetahui karakteristik arus *inrush* akibat adanya *residual fluks* dengan metode penyalan non-skuensial dan skuensial dibahas secara menyeluruh pada bab 4, dimulai dari proses pengujian alat, akuisisi data percobaan, dan menganalisa hasil akuisisi data tersebut, sehingga di dapatkan kesimpulan dari karakteristik arus *inrush* transformator saat terdapat *residual fluks*. Gambar modul demagnetisasi ditunjukkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Modul demagnetisasi transformator 3 fasa

4.1 Pengujian Alat

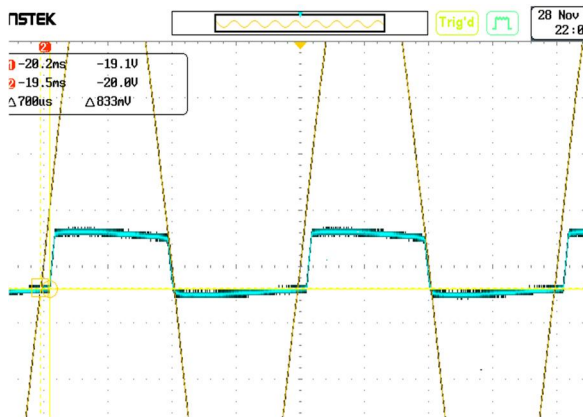
Pada pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan besaran puncak arus *inrush* transformator uji dengan 2 sudut penyalan yang berbeda, yakni sudut penyalan 0 derajat dan 90 derajat. Hal ini bertujuan untuk memahami karakteristik arus *inrush* transformator uji. Secara teori, arus *inrush* memiliki magnitudo maksimum pada saat dinyalakan dengan sudut penyalan 0 derajat dan memiliki magnitudo minimum pada saat dinyalakan dengan sudut penyalan 90 derajat [1].

Langkah pertama yang harus dilakukan untuk pengujian alat adalah mengkalibrasi modul uji arus *inrush* terlebih dahulu, modul harus

dipastikan dapat bekerja pada sudut penyalan 0 derajat ataupun 90 derajat, serta dapat melakukan proses magnetisasi postif pada transformator uji.

4.1.1 Kalibrasi Sudut Penyalan

Pengkalibrasian sudut penyalan dimulai dari melihat respon keluaran sinyal rangkaian *zero crossing*, dan sumber tegangan AC yang nantinya digunakan untuk *energize* transformator uji melalui osiloskop. Dengan melihat respon waktu tersebut, maka akan didapatkan perkiraan waktu tunda yang kemudian di atur pada pemograman Arduino , agar sudut penyalan dapat dikondisikan 0 derajat maupun 90 derajat secara non skuensial ataupun skuensial dari ketiga tegangan masukan. Pada gambar 4.2 ditunjukkan respon perbedaan waktu antara sinyal keluaran *zero crossing* dengan sumber tegangan AC.

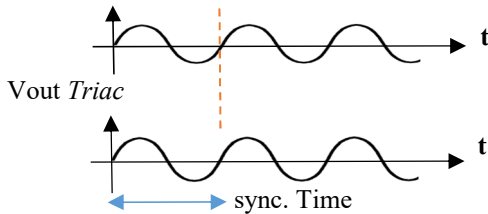


Gambar 4.2 Time delay zero crossing dengan sumber tegangan AC

Setelah perbedaan waktu dari keduanya diketahui, maka selanjutnya mengintepresentasikan perkiraan waktu tunda ke dalam *source code* pemograman Arduino, kemungkinan besar perkiraan waktu tunda tersebut dapat bertambah dikarenakan waktu yang dibutuhkan untuk eksekusi program di dalam Arduino. Oleh karena itu proses sinkronisasi modul penujian arus *inrush* yang dimulai dari sinyal *zero crossing* sampai dengan pensakelaran *Triac* memerlukan waktu tunda

sebesar satu *cycle* dari setiap tegangannya, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4.3.

Vin (jala-jala)



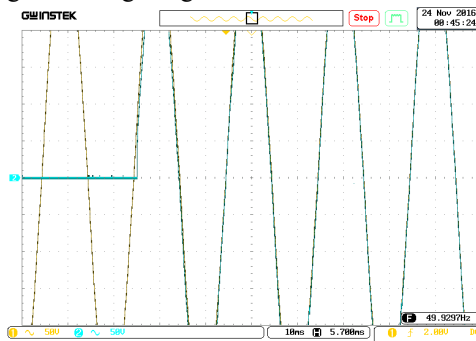
Gambar 4.3 Proses sinkronisasi modul arus *inrush* terhadap input tegangan jala-jala

Jika proses sudut penyalan secara non-skuensial dipilih maka secara bersamaan tegangan fasa L1, L2, dan L3 meng-*energize* transformator. Sedangkan jika skuensial, proses dimulai dari fasa L1, maka waktu tunda satu *cycle* dari fasa L1, akan ditambah waktu tunda dengan fasa L2, kemudian proses skuensial selanjutnya waktu tunda L2 ditambah dengan waktu tunda L3, sehingga proses penyalan skuensial dapat berjalan. Dengan sumber tegangan AC 3 fasa dalam kondisi yang seimbang yang mempunyai frekuensi 50Hz, maka waktu tunda skuensial untuk sudut penyalan 0 derajat dari setiap fasa adalah 120 derajat atau sekitar 6,67ms. Sedangkan untuk sudut penyalan 90 derajat maka dibutuhkan penambahan waktu tunda sebesar 5ms dari sudut penyalan 0 derajat. Gambar 4.4 menunjukkan kalibrasi waktu tunda sudut penyalan 0 derajat dan 90 derajat dalam bentuk *source code* pemrograman Arduino.

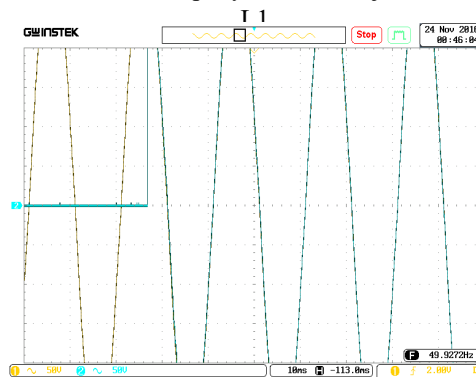
```
switch(DegreePos) {
  case 0://0 derajat
    while(CheckingRisingZC) {
      if(digitalRead(ZcR) == LOW) Rotate = true;
      if(digitalRead(ZcR) == HIGH && Rotate == true) {
        StartTime = millis();
        delay(20);
        digitalWrite(TrR, HIGH);
        delay(6);
        digitalWrite(TrS, HIGH);
        delay(7);
        digitalWrite(TrT, HIGH);
        CheckingRisingZC = false;
      }
    }
  case 1://90 derajat
    while(CheckingRisingZC) {
      if(digitalRead(ZcR) == LOW) Rotate = true;
      if(digitalRead(ZcR) == HIGH && Rotate == true) {
        StartTime = millis();
        delay(25);
        digitalWrite(TrR, HIGH);
        delay(6.6);
        digitalWrite(TrS, HIGH);
        delay(7.3);
        digitalWrite(TrT, HIGH);
        CheckingRisingZC = false;
      }
    }
}
```

Gambar 4.4 *Source code* waktu tunda sudut penyalan secara skuensial

Kalibrasi modul dilakukan dengan memasang *probe Channel 1* osiloskop pada tegangan jala-jala (PLN) yang terhubung dengan modul dan memasang *probe Channel 2* osiloskop pada tegangan output TRIAC yang sesuai dengan sumber tegangan yang terhubung dengan modul. Hal tersebut dilakukan secara bergantian pada setiap sumber AC 3 fasa, sehingga jika gelombang yang di tunjukan osiloskop tersebut saling berhimpit saat sedang di-*energize* maka dapat dipastikan sudut penyalan berjalan secara skuensial pada setiap fasanya. Gambar 4.5 dan gambar 4.6 menunjukan hasil kalibrasi sudut penyalan dari salah satu fasa sumber tegangan yang terhubung dengan modul.



Gambar 4.5 Kalibrasi sudut penyalan 0 derajat secara skuensial fasa

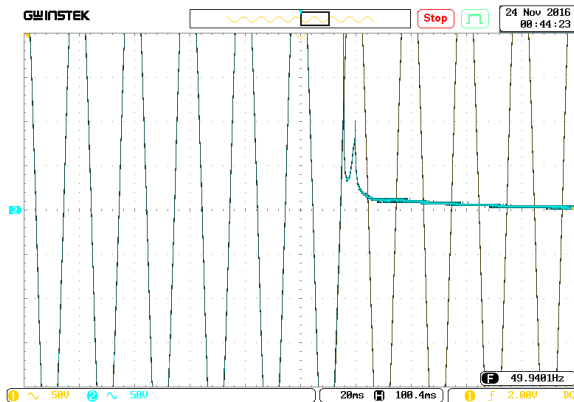


Gambar 4.6 Kalibrasi sudut penyalan 90 derajat secara skuensial fasa
L1

4.1.2 Kalibrasi Magnetisasi Transformator Uji

Proses magnetisasi dalam modul pengujian arus *inrush* ini, dilakukan menggunakan sumber listrik AC yang besarnya sesuai dengan tegangan rating masukan transformator uji. Proses magnetisasi dilakukan selama 3 menit dengan sudut penyalaan 0 derajat secara skuensial dan ketika waktu 3 menit berakhir pensakelaran *Triac* akan selalu berhenti pada saat sumber AC dalam kondisi positif.

Hal tersebut dilakukan untuk mendapatkan hasil pengujian arus *inrush* dari hasil pengondisian proses magnetisasi yang selalu sama di setiap pengujian, sehingga *residual fluks* pada setiap pengujian diharapkan besarnya selalu sama. Proses magnetisasi transformator uji pada salah satu fasa sumber AC tunjukan pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Magnetisasi transformator uji pada fasa L1

Pengamatan proses magnetisasi dilakukan dengan memasang *probe Channel 1* osiloskop pada tegangan jala-jala fasa L1 dan memasang *probe Channel 2* osiloskop pada tegangan output TRIAC fasa L1.

4.1.3 Pengujian Sakelar Demagnetisasi

Proses demagnetisasi pada modul dilakukan dengan cara menekan kedua sakelar pilih ke posisi demagnetisasi. Ketika sakelar pilih pada posisi demagnetisasi, maka empat terminal masukan (L1, L2, L3, netral) pada transformator tersambung dengan kapasitor demagnetisasi

modul dan *residual fluks* pada transformator mulai menghilang dari inti transformator sedikit demi sedikit tergantung dengan waktu demagnetisasi yang dilakukan. Lama waktu demagnetisasi dapat dipilih pada menu modul uji. Dengan memilih menu demagnetisasi, maka keluar dua pilihan waktu demagnetisasi selama 3 menit atau 9 menit. Setelah lama waktu demagnetisasi sudah dipilih, selanjutnya waktu akan mulai menghitung mundur dan ketika waktu demagnetisasi habis, akan ada indikator berupa suara dari *buzzer*. Selanjutnya sakelar pilih dapat dipindah lagi ke posisi *energize* untuk proses pengujian berikutnya. Sakelar pilih modul uji ditunjukkan gambar 4.8 dan menu waktu demagnetisasi modul uji ditunjukkan pada gambar 4.9.



Gambar 4.8 Sakelar pilih modul uji



Gambar 4.9 Menu waktu demagnetisasi modul uji

4.2 Akusisi Data

Akuisisi data untuk mengetahui karakteristik arus *inrush* pada transformator uji 3kVA 3 fasa tanpa beban dilakukan dengan menggunakan osiloskop digital. Proses akusisi data ditunjukkan pada gambar 4.10. Akusisi data dilakukan pada sudut penyalan 0 derajat dan 90 derajat, dengan pengondisian *residual fluks* dan proses demagnetisasi yang dibagi menjadi 3 kondisi pengujian untuk proses penyalan skuensial, sedangkan untuk proses non-skuensial hanya dilakukan pada 2 kondisi, yaitu kondisi 1 dan 3 pada percobaan secara skuensial. Berikut ini adalah ketiga kondisi akusisi data yang dilakukan secara skuensial untuk mendapatkan karakteristik arus *inrush* ketika terdapat *residual fluks* pada transformator uji. :

1. Pengujian 1

- Sudut penyalan 0 derajat

Trafo harus mengalami proses magnetisasi selama 3 menit dengan tegangan nominal trafo, kemudian setelah proses magnetisasi, trafo di-*energize* dengan sudut penyalan 0 derajat selama 10 detik untuk mengukur arus *inrush*. Pengujian dilakukan sebanyak 5 kali, tanpa ada proses demagnetisasi trafo.

- Sudut penyalan 90 derajat

Trafo harus mengalami proses magnetisasi selama 3 menit dengan tegangan nominal trafo, kemudian setelah proses magnetisasi, trafo di-*energize* dengan sudut penyalan 90 derajat selama 10 detik untuk mengukur arus *inrush*. Pengujian dilakukan sebanyak 5 kali, tanpa ada proses demagnetisasi trafo.

2. Pengujian 2

- Sudut penyalan 0 derajat

Trafo harus mengalami proses magnetisasi selama 3 menit dengan tegangan nominal trafo, kemudian setelah proses magnetisasi, trafo di-*energize* dengan sudut penyalan 0 derajat selama 10 detik untuk mengukur arus *inrush*. Pengujian dilakukan sebanyak 5 kali pengambilan data dan setiap pengambilan data berulang trafo harus di-*demagnetisasi* selama 3 menit.

- Sudut penyalan 90 derajat

Trafo harus mengalami proses magnetisasi selama 3 menit dengan tegangan nominal trafo, kemudian setelah proses magnetisasi, trafo di-*energize* dengan sudut penyalan 90 derajat selama 10 detik untuk mengukur arus *inrush*. Pengujian dilakukan sebanyak 5 kali pengambilan data dan setiap pengambilan data berulang trafo harus di-*demagnetisasi* selama 3 menit.

3. Pengujian 3

- Sudut penyalan 0 derajat

Trafo harus mengalami proses magnetisasi selama 3 menit dengan tegangan nominal trafo, kemudian setelah proses magnetisasi, trafo di-*energize* dengan sudut penyalan 0 derajat selama 10 detik untuk mengukur arus *inrush*. Pengujian dilakukan sebanyak 5 kali pengambilan data dan setiap pengambilan data berulang trafo harus di-*demagnetisasi* selama 9 menit.

- Sudut penyalan 90 derajat

Trafo harus mengalami proses magnetisasi selama 3 menit dengan tegangan nominal trafo, kemudian setelah proses magnetisasi, trafo di-*energize* dengan sudut penyalan 90 derajat selama 10 detik untuk mengukur arus *inrush*. Pengujian dilakukan sebanyak 5 kali pengambilan data dan setiap pengambilan data berulang trafo harus di-*demagnetisasi* selama 9 menit.



Gambar 4.10 Proses akusisi data pada transformator uji

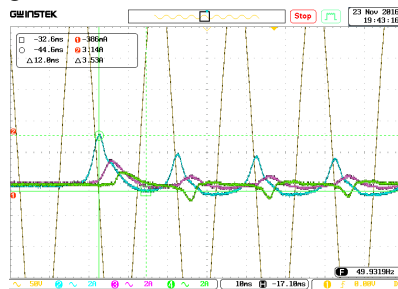
Akuisisi data dilakukan pada transformator 3 kVA 3 fasa yang dipasang dengan model hubungan Y-Y dengan metode sudut penyalan secara non-skuensial dan skuensial. Dengan membandingkan data dari hasil pengujian nantinya, diharapkan dapat mengetahui pengaruh fluks residu terhadap *tren* dari arus *inrush* transformator uji.

4.3 Hasil Pengujian

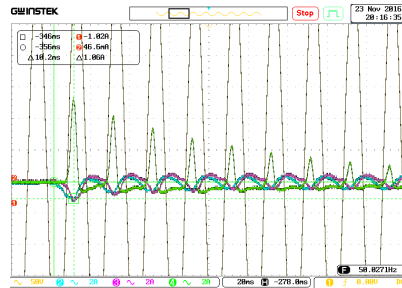
Pengujian dilakukan pada sudut penyalan 0 derajat dan 90 derajat secara skuensial dan non-secara skuensial pada setiap fasanya. Semua cara penyambungan alat modul demagnetisasi, alat pengamatan atau pengukuran dengan transformator uji pada semua proses akuisisi data selalu sama.

Pengukuran arus *inrush* transformator uji 3 kVA 3 fasa dengan konfigurasi hubungan Y-Y tanpa beban, menggunakan 1 buah probe tegangan yang di hubungkan pada *channel* 1 dan 3 buah probe arus yang dihubungkan pada masing - masing *channel* 2, 3, dan 4 osiloskop. Probe tegangan di hubungkan dengan sumber listrik L1 pada modul, sedangkan probe arus di hubungkan ke terminal masukan transformator uji.

Pengujian di awali dengan melihat nilai rata - rata arus *inrush* tanpa adanya injeksi fluks atau fluks sisa pada transformator uji, pengujian dilakukan sebanyak 5 kali pada sudut penyalan 0 derajat, maupun pada sudut penyalan 90 derajat. Salah satu hasil pengukuran osiloskop untuk sudut penyalan 0 derajat secara skuensial ditunjukkan pada gambar 4.11 dan pada sudut penyalan 90 derajat secara skuensial ditunjukkan pada gambar 4.12.



Gambar 4.11 Pengujian arus *inrush peak* tanpa injeksi fluks dengan sudut penyalan 0 derajat secara skuensial



Gambar 4.12 Pengujian arus *inrush peak* tanpa injeksi fluks dengan sudut penyalan 90 derajat secara skuensial

Hasil pengujian sebanyak 5 kali pada sudut penyalan 0 derajat secara skuensial di sajikan tabel 4.1 dan untuk sudut penyalan 90 derajat secara skuensial di sajikan pada tabel 4.2.

Tabel 4.1 Pengujian arus *inrush* tanpa injeksi fluks sudut 0 derajat secara skuensial

Percobaan ke	Pengujian arus <i>Inrush Peak</i> Tanpa Injeksi Fluks Residu (I_{inr})		
	R (A)	S (A)	T (A)
1	3,70	1,90	1,10
2	3,53	1,70	0,97
3	3,16	1,63	1,00
4	3,97	2,03	1,33
5	3,69	1,66	1,09

Tabel 4.2 Pengujian arus *inrush* tanpa injeksi fluks sudut 90 derajat secara skuensial

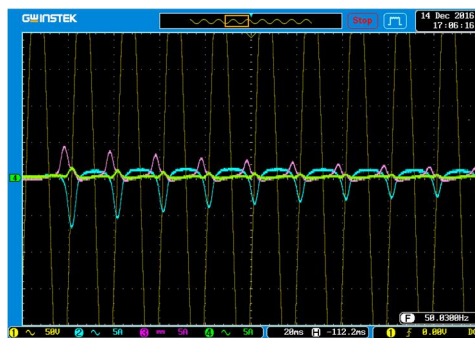
Percobaan ke	Pengujian arus <i>Inrush Peak</i> Tanpa Injeksi Fluks Residu (I_{inr})		
	R (A)	S (A)	T (A)
1	1,33	1,60	5,93
2	1,46	1,56	6,23
3	1,38	1,78	5,36

Percobaan ke	Pengujian arus <i>Inrush Peak</i> Tanpa Injeksi Fluks Residu (I_{inr})		
	R (A)	S (A)	T (A)
4	1,42	1,69	5,87
5	1,36	1,71	5,42

Sedangkan salah satu hasil pengukuran osiloskop untuk sudut penyalan 0 derajat secara non-skuensial ditunjukkan pada gambar 4.13 dan pada sudut penyalan 90 derajat secara non-skuensial ditunjukkan pada gambar 4.14.



Gambar 4.13 Pengujian arus *inrush peak* tanpa injeksi fluks dengan sudut penyalan 0 derajat secara non-skuensial



Gambar 4.14 Pengujian arus *inrush peak* tanpa injeksi fluks dengan sudut penyalan 90 derajat secara non-skuensial

Hasil pengujian sebanyak 5 kali pada sudut penyalan 0 derajat secara non-skuensial di sajikan tabel 4.3 dan untuk sudut penyalan 90 derajat secara non-skuensial di sajikan pada tabel 4.4.

Tabel 4.3 Pengujian arus *inrush* tanpa injeksi fluks sudut 0 derajat secara non-skuensial

Percobaan ke	Pengujian arus <i>Inrush Peak</i> Tanpa Injeksi Fluks Residu (I_{inr})		
	R (A)	S (A)	T (A)
1	8,91	3,25	26,21
2	8,83	3,50	26,00
3	8,75	3,33	25,19
4	8,82	3,39	26,12
5	8,87	3,45	26,51

Tabel 4.4 Pengujian arus *inrush* tanpa injeksi fluks sudut 90 derajat secara non-skuensial

Percobaan ke	Pengujian arus <i>Inrush Peak</i> Tanpa Injeksi Fluks Residu (I_{inr})		
	R (A)	S (A)	T (A)
1	7,66	4,62	1,66
2	7,75	4,6	1,50
3	7,58	4,75	1,68
4	7,16	3,25	1,41
5	7,31	3,47	1,49

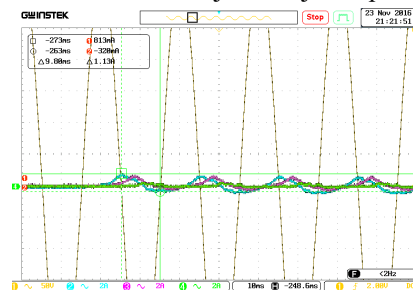
Setelah hasil pengujian untuk melihat nilai arus *inrush* tanpa injeksi fluks residu, maka selanjutnya adalah melihat nilai rata - rata nilai arus *inrush* saat tanpa *residual fluks* pada transformator uji. Jika dilihat pada tabel 4.3, dapat disimpulkan bahwa nilai rata – rata arus *inrush* tanpa injeksi fluks residu saat sudut penyalan 0 derajat non-skuensial untuk fasa R 8,83 A, fasa S 3,38 A, fasa T 26,0 A, sedangkan nilai rata – rata arus *inrush* tanpa injeksi fluks residu saat sudut penyalan 90 derajat

untuk fasa R 7,49 A, fasa S 4,15 A, fasa T 1,53 A. Pengujian selanjutnya adalah proses pengujian yang sesuai perencanaan akusisi data yang telah dibahas sebelumnya.

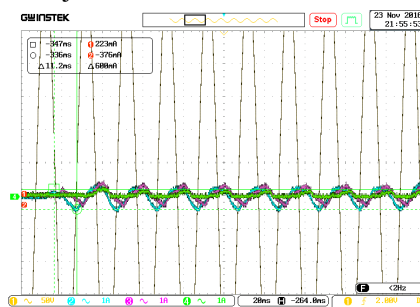
4.3.1 Hasil Pengukuran Pengujian 1

Akusisi data pada pengujian 1 dilakukan tanpa ada proses demagnetisasi pada proses pengambilan data, jadi setelah transformator uji di magnetisasi tegangan uji selama 3 menit dan di-*energized* selama 10 detik, transformator kembali di magnetisasi, kemudian di-*energized* lagi. Proses tersebut dilakukan sampai dengan 5 kali pengambilan data, baik untuk sudut penyalan 0 derajat maupun 90 derajat, dan baik secara skuensial ataupun non skuensial.

Salah satu hasil pengukuran osiloskop untuk sudut penyalan 0 derajat secara skuensial ditunjukkan pada gambar 4.15 dan pada sudut penyalan 90 derajat secara skuensial ditunjukkan pada gambar 4.16.



Gambar 4.15 Pengukuran arus *inrush* pengujian 1 untuk sudut penyalan 0 derajat secara skuensial



Gambar 4.16 Pengukuran arus *inrush* pengujian 1 untuk sudut penyalan 90 derajat secara skuensial

Data hasil pengujian pada sudut penyalan 0 derajat secara skuensial ditunjukkan pada tabel 4.5 dan data hasil pengujian sudut penyalan 90 derajat secara skuensial ditunjukkan pada tabel 4.6.

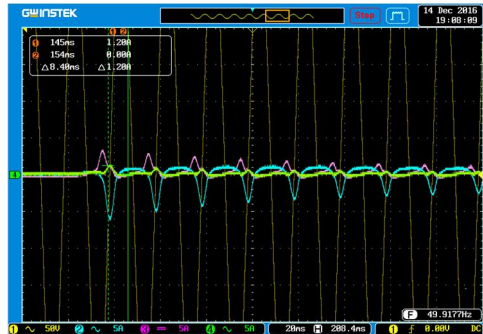
Pada tabel 4.5 menunjukkan bahwa arus *inrush* pada pengujian 1 dengan sudut penyalan secara skuensial mengalami penurunan rasio terhadap nilai rata – rata arus *inrush* tanpa injeksi fluks residu, rasio pada fasa R berkisar antara $0,39I_{inr}$ - $0,41I_{inr}$, rasio pada fasa S berkisar antara $0,49I_{inr}$ - $0,63I_{inr}$, rasio pada fasa T berkisar antara $0,43I_{inr}$ - $0,49I_{inr}$ dan arus *inrush* pada pengujian 1 juga mengalami penurunan rasio terhadap nilai arus nominal (I_n) rasio pada fasa R berkisar antara $0,31I_n$ - $0,33I_n$, rasio pada fasa S berkisar antara $0,20I_n$ - $0,25I_n$, rasio pada fasa T berkisar antara $0,08I_n$ - $0,11I_n$.

Sedangkan pada tabel 4.6 menunjukkan bahwa arus *inrush* pada pengujian 1 dengan sudut penyalan secara skuensial mengalami penurunan rasio terhadap nilai rata – rata arus *inrush* tanpa injeksi fluks residu, rasio pada fasa R berkisar antara $0,39I_{inr}$ - $0,45I_{inr}$, rasio pada fasa S berkisar antara $0,30I_{inr}$ - $0,34I_{inr}$, rasio pada fasa T berkisar antara $0,04I_{inr}$ - $0,05I_{inr}$ dan arus *inrush* pada pengujian 1 juga mengalami penurunan rasio terhadap nilai arus nominal (I_n) rasio pada fasa R berkisar antara $0,12I_n$ - $0,13I_n$, rasio pada fasa S berkisar antara $0,11I_n$ - $0,12I_n$, rasio pada fasa T berkisar antara $0,05I_n$ - $0,06I_n$.

Hasil pengukuran osiloskop untuk sudut penyalan 0 derajat secara non-skuensial ditunjukkan pada gambar 4.17 dan pada sudut penyalan 90 secara non-skuensial derajat ditunjukkan pada gambar 4.18.



Gambar 4.17 Pengukuran arus *inrush* pengujian 1 untuk sudut penyalan 0 derajat secara non-skuensial



Gambar 4.18 Pengukuran arus *inrush* pengujian luntuk sudut penyalan 90 derajat secara non-skuensial

Data hasil pengujian pada sudut penyalan 0 derajat secara non-skuensial ditunjukkan pada tabel 4.7 dan data hasil pengujian sudut penyalan 90 derajat secara non-skuensial ditunjukkan pada tabel 4.8.

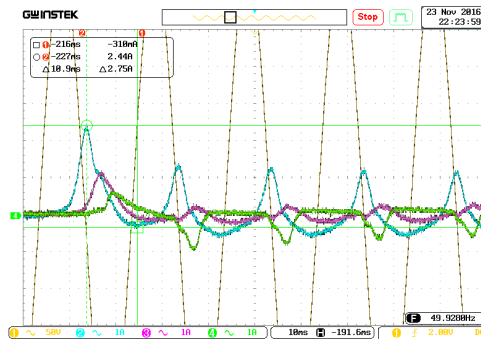
Pada tabel 4.7 menunjukkan bahwa arus *inrush* pada pengujian 1 dengan sudut penyalan secara non-skuensial mengalami penurunan rasio terhadap nilai rata – rata arus *inrush* tanpa injeksi fluks residu, rasio pada fasa R berkisar antara $0,29I_{inr}$ - $0,35I_{inr}$, rasio pada fasa S berkisar antara $0,44I_{inr}$ - $0,53I_{inr}$, rasio pada fasa T berkisar antara $0,17I_{inr}$ - $0,21I_{inr}$ dan arus *inrush* pada pengujian 1 juga mengalami penurunan rasio terhadap nilai arus nominal (I_n) rasio pada fasa R berkisar antara $0,57I_n$ - $0,67I_n$, rasio pada fasa S berkisar antara $0,33I_n$ - $0,39I_n$, tetapi pada fasa T nilai arus *inrush* kebanyakan sama dengan nilai arus nominal, besarnya rasio pada fasa T berkisar antara $0,99I_n$ - $1,22I_n$.

Pada tabel 4.8 menunjukkan bahwa arus *inrush* pada pengujian 1 dengan sudut penyalan secara non-skuensial mengalami penurunan rasio terhadap nilai rata – rata arus *inrush* tanpa injeksi fluks residu, rasio pada fasa R berkisar antara $0,21I_{inr}$ - $0,23I_{inr}$, rasio pada fasa S berkisar antara $0,29I_{inr}$ - $0,31I_{inr}$, rasio pada fasa T berkisar antara $0,31I_{inr}$ - $0,37I_{inr}$ dan arus *inrush* pada pengujian 1 juga mengalami penurunan rasio terhadap nilai arus nominal (I_n) rasio pada fasa R berkisar antara $0,35I_n$ - $0,39I_n$, rasio pada fasa S berkisar antara $0,26I_n$ - $0,28I_n$, rasio pada fasa T berkisar antara $0,11I_n$ - $0,12I_n$.

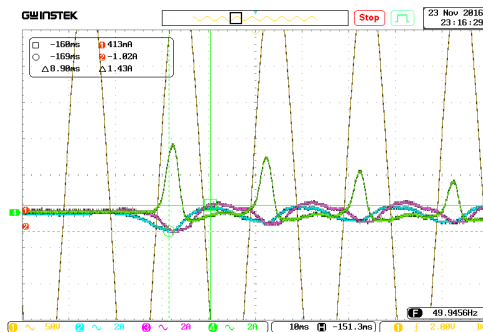
4.3.2 Hasil Pengukuran Pengujian 2

Akuisisi data pada pengujian 2 dilakukan hanya pada sudut penyalan skuensial, dan dengan proses demagnetisasi selama 3 menit pada proses pengambilan data, jadi setelah transformator uji di magnetisasi tegangan uji selama 3 menit dan di-energized selama 10 detik, transformator kembali di magnetisasi, kemudian di-energized lagi. Proses tersebut dilakukan sampai dengan 5 kali pengambilan data, baik untuk sudut penyalan 0 derajat maupun 90 derajat.

Salah satu hasil pengukuran osiloskop untuk sudut penyalan 0 derajat ditunjukkan pada gambar 4.19 dan pada sudut penyalan 90 derajat ditunjukkan pada gambar 4.20.



Gambar 4.19 Pengukuran arus *inrush* pengujian 2 untuk sudut penyalan 0 derajat secara skuensial



Gambar 4.20 Pengukuran arus *inrush* pengujian 2 untuk sudut penyalan 90 derajat secara skuensial

Data hasil pengujian pada sudut penyalan 0 derajat secara skuensial ditunjukkan pada tabel 4.9 dan data hasil pengujian sudut penyalan 90 derajat secara skuensial ditunjukkan pada tabel 4.10.

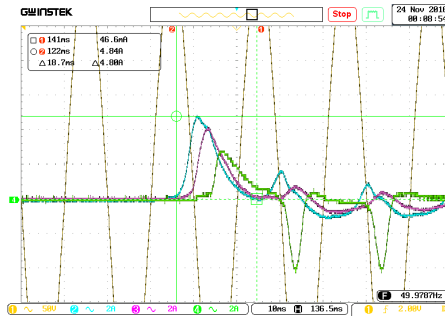
Pada tabel 4.9 menunjukkan bahwa arus *inrush* pada pengujian 2 mengalami penurunan rasio terhadap nilai rata – rata arus *inrush* tanpa injeksi fluks residu, rasio pada fasa R berkisar antara $0,53I_{inr} - 0,70I_{inr}$, rasio pada fasa S berkisar antara $0,70I_{inr} - 0,71I_{inr}$, tetapi mengalami kenaikan rasio yang nilainya sama dengan nilai rata – ratanya di fasa T, rasio pada fasa T berkisar antara $0,93I_{inr} - 1,25I_{inr}$. Sedangkan arus *inrush* pada pengujian 2 mengalami penurunan rasio terhadap nilai arus nominal (I_n) rasio pada fasa R berkisar antara $0,42I_n - 0,56I_n$, rasio pada fasa S berkisar antara $0,28I_n - 0,29I_n$, rasio pada fasa T berkisar antara $0,26I_n - 0,30I_n$.

Pada tabel 4.10 menunjukkan bahwa arus *inrush* pada pengujian 2 mengalami penurunan rasio terhadap nilai rata – rata arus *inrush* tanpa injeksi fluks residu, rasio pada fasa R berkisar antara $0,97I_{inr} - 1,05I_{inr}$, rasio pada fasa S berkisar antara $0,88I_{inr} - 0,94I_{inr}$, rasio pada fasa T berkisar antara $0,71I_{inr} - 0,72I_{inr}$ dan arus *inrush* pada pengujian 2 juga mengalami penurunan rasio terhadap nilai arus nominal (I_n) rasio pada fasa R berkisar antara $0,29I_n - 0,32I_n$, rasio pada fasa S berkisar antara $0,32I_n - 0,34I_n$, rasio pada fasa T berkisar antara $0,90I_n - 0,92I_n$.

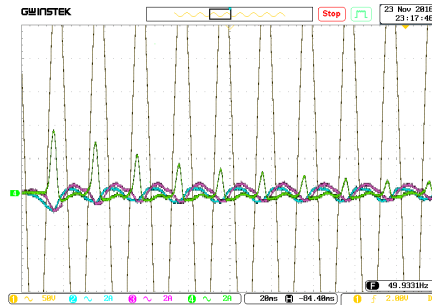
4.3.3 Hasil Pengukuran Pengujian 3

Akusisi data pada pengujian 3 dilakukan dengan proses demagnetisasi selama 9 menit pada proses pengambilan data, jadi setelah transformator uji di magnetisasi tegangan uji selama 3 menit dan di-*energized* selama 10 detik, transformator kembali di magnetisasi, kemudian di-*energized* lagi. Proses tersebut dilakukan sampai dengan 5 kali pengambilan data, baik untuk sudut penyalan 0 derajat maupun 90 derajat dan baik secara skuensial ataupun non skuensial.

Salah satu hasil pengukuran osiloskop untuk sudut penyalan 0 derajat secara skuensial ditunjukkan pada gambar 4.21 dan pada sudut penyalan 90 derajat secara skuensial ditunjukkan pada gambar 4.22.



Gambar 4.21 Pengukuran arus *inrush* pengujian 3 untuk sudut penyalan 0 derajat secara skuensial



Gambar 4.22 Pengukuran arus *inrush* pengujian 3 untuk sudut penyalan 90 derajat secara skuensial

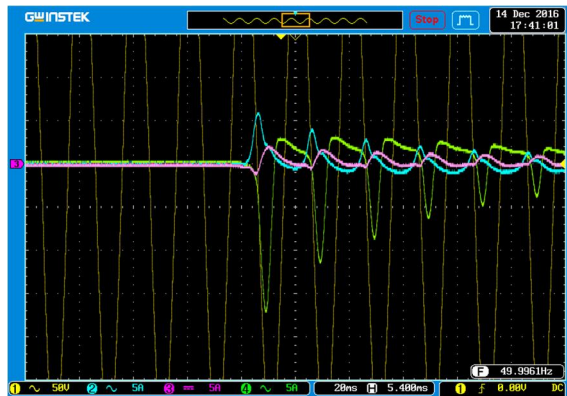
Data hasil pengujian pada sudut penyalan 0 derajat secara skuensial ditunjukkan pada tabel 4.11 dan data hasil pengujian sudut penyalan 90 derajat secara skuensial ditunjukkan pada tabel 4.12.

Pada tabel 4.11 menunjukkan bahwa arus *inrush* pada pengujian 3 dengan sudut penyalan secara skuensial, rasio arus *inrush* terhadap nilai rata – rata arus *inrush* tanpa injeksi fluks residu sudah sama, rasio pada fasa R berkisar antara $0,96I_{inr}$ - $1,01I_{inr}$, rasio pada fasa S berkisar antara $0,97I_{inr}$ - $1,02I_{inr}$, rasio pada fasa T berkisar antara $0,73I_{inr}$ - $1,2I_{inr}$, sedangkan pada arus *inrush* pada pengujian 3 juga mengalami penurunan rasio terhadap nilai arus nominal (I_n) rasio pada fasa R

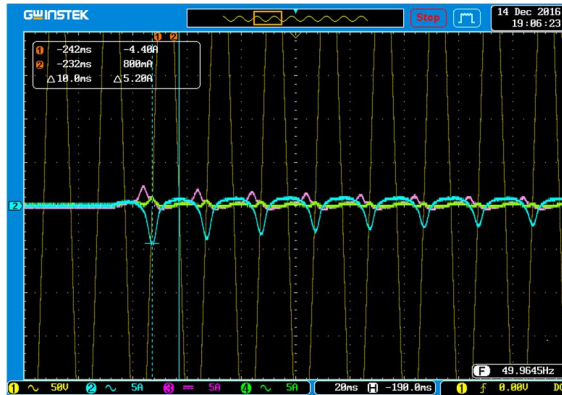
berkisar antara $0,76I_n$ - $0,81I_n$, rasio pada fasa S berkisar antara $0,39I_n$ - $0,41I_n$, rasio pada fasa T berkisar antara $0,17I_n$ - $0,29I_n$.

Pada tabel 4.12 menunjukkan bahwa arus *inrush* pada pengujian 3 dengan sudut penyalan secara skuensial, rasio arus *inrush* terhadap nilai rata – rata arus *inrush* tanpa injeksi fluks residu sudah banyak yang sama, rasio pada fasa R berkisar antara $0,97I_{inr}$ - $1,02I_{inr}$, rasio pada fasa S berkisar antara $0,95I_{inr}$ - $1,05I_{inr}$, rasio pada fasa T berkisar antara $0,92I_{inr}$ - $1,07I_{inr}$. Sedangkan arus *inrush* pada pengujian 3 mengalami penurunan rasio terhadap nilai arus nominal (I_n) rasio pada fasa R berkisar antara $0,30I_n$ - $0,31I_n$, rasio pada fasa S berkisar antara $0,35I_n$ - $0,38I_n$, rasio pada fasa T berkisar antara $1,22I_n$ - $1,36I_n$.

Hasil pengukuran osiloskop untuk sudut penyalan 0 derajat secara non-skuensial ditunjukkan pada gambar 4.23 dan pada sudut penyalan 90 derajat secara non-skuensial ditunjukkan pada gambar 4.24.



Gambar 4.23 Pengukuran arus *inrush* pengujian 3 untuk sudut penyalan 0 derajat secara non-skuensial



Gambar 4.24 Pengukuran arus *inrush* pengujian 3 untuk sudut penyalan 90 derajat secara non-skuensial

Data hasil pengujian pada sudut penyalan 0 derajat secara non-skuensial ditunjukkan pada tabel 4.13 dan data hasil pengujian sudut penyalan 90 derajat secara non-skuensial ditunjukkan pada tabel 4.14.

Pada tabel 4.13 menunjukkan bahwa arus *inrush* pada pengujian 3 dengan sudut penyalan secara non-skuensial mengalami penurunan rasio terhadap nilai rata – rata arus *inrush* tanpa injeksi fluks residu, rasio pada fasa R berkisar antara $0,67I_{inr}$ - $0,82I_{inr}$, rasio pada fasa S berkisar antara $0,50I_{inr}$ - $1,01I_{inr}$, rasio pada fasa T berkisar antara $0,68I_{inr}$ - $0,73I_{inr}$. Arus *inrush* pada pengujian 3 mengalami kenaikan rasio terhadap nilai arus nominal (I_n), rasio pada fasa R berkisar antara $1,3I_n$ - $1,59I_n$, rasio pada fasa T berkisar antara $3,92I_n$ - $4,19I_n$, dan mengalami penurunan rasio pada fasa S berkisar antara $0,37I_n$ - $0,75I_n$,

Pada tabel 4.14 menunjukkan bahwa arus *inrush* pada pengujian 3 dengan sudut penyalan secara non-skuensial mengalami penurunan rasio terhadap nilai rata – rata arus *inrush* tanpa injeksi fluks residu, rasio pada fasa R berkisar antara $0,69I_{inr}$ - $0,91I_{inr}$, rasio pada fasa S berkisar antara $0,63I_{inr}$ - $0,94I_{inr}$, rasio pada fasa T berkisar antara $0,56I_{inr}$ - $0,80I_{inr}$ dan arus *inrush* pada pengujian 3 mengalami kenaikan rasio terhadap nilai arus nominal (I_n) rasio pada fasa R berkisar antara $1,34I_n$ - $1,5I_n$, dan mengalami penurunan dengan rasio pada fasa S berkisar antara $0,62I_n$ - $0,86I_n$, rasio pada fasa T berkisar antara $0,19I_n$ - $0,27I_n$.

Tabel 4.5 Hasil pengukuran arus *inrush* pengujian 1 sudut penyalan 0 derajat secara skuensial

Percobaan ke	Inrush Peak Dengan Fluks Residu			Rata-Rata Pengujian Inrush Peak Tanpa Injeksi Fluks Residu (I_{inr})			Arus Nominal (I_n)	Persentase Inrush Peak Dengan Fluks Residu Terhadap I_{inr} dan I_n					
								I_{inr}			I_n		
	R	S	T	R	S	T		R	S	T	R	S	T
1	1,53	1,16	0,50	3,61	1,84	1,10	4,54	0,42 I_{inr}	0,63 I_{inr}	0,45 I_{inr}	0,33 I_n	0,25 I_n	0,11 I_n
2	1,50	1,13	0,53	3,61	1,84	1,10	4,54	0,42 I_{inr}	0,61 I_{inr}	0,48 I_{inr}	0,33 I_n	0,24 I_n	0,11 I_n
3	1,43	0,91	0,40	3,61	1,84	1,10	4,54	0,39 I_{inr}	0,49 I_{inr}	0,36 I_{inr}	0,31 I_n	0,20 I_n	0,08 I_n
4	1,49	1,07	0,48	3,61	1,84	1,10	4,54	0,41 I_{inr}	0,58 I_{inr}	0,43 I_{inr}	0,32 I_n	0,23 I_n	0,10 I_n
5	1,51	1,12	0,54	3,61	1,84	1,10	4,54	0,42 I_{inr}	0,61 I_{inr}	0,49 I_{inr}	0,33 I_n	0,24 I_n	0,11 I_n

Tabel 4.6 Hasil pengukuran arus *inrush* pengujian 1 sudut penyalan 90 derajat secara skuensial

Percobaan ke	<i>Inrush Peak</i> Dengan Fluks Residu			Rata-Rata Pengujian <i>Inrush Peak</i> Tanpa Injeksi Fluks Residu (I_{inr})			Arus Nominal (I_n)	Persentase <i>Inrush Peak</i> Dengan Fluks Residu Terhadap I_{inr} dan I_n					
								I_{inr}			I_n		
	R	S	T	R	S	T		R	S	T	R	S	T
1	0,57	0,52	0,27	1,39	1,67	5,77	4,54	0,41 I_{inr}	0,31 I_{inr}	0,04 I_{inr}	0,12 I_n	0,11 I_n	0,05 I_n
2	0,60	0,55	0,28	1,39	1,67	5,77	4,54	0,43 I_{inr}	0,32 I_{inr}	0,04 I_{inr}	0,13 I_n	0,12 I_n	0,06 I_n
3	0,63	0,58	0,31	1,39	1,67	5,77	4,54	0,45 I_{inr}	0,34 I_{inr}	0,05 I_{inr}	0,13 I_n	0,12 I_n	0,06 I_n
4	0,59	0,51	0,29	1,39	1,67	5,77	4,54	0,42 I_{inr}	0,30 I_{inr}	0,05 I_{inr}	0,12 I_n	0,11 I_n	0,06 I_n
5	0,55	0,52	0,26	1,39	1,67	5,77	4,54	0,39 I_{inr}	0,31 I_{inr}	0,04 I_{inr}	0,12 I_n	0,11 I_n	0,05 I_n

Tabel 4.7 Hasil pengukuran arus *inrush* pengujian 1 sudut penyalan 0 derajat secara non-skuensial

Percobaan ke	Inrush Peak Dengan Fluks Residu			Rata-Rata Pengujian Inrush Peak Tanpa Injeksi Fluks Residu (I_{inr})			Arus Nominal (I_n)	Persentase Inrush Peak Dengan Fluks Residu Terhadap I_{inr} dan I_n					
								I_{inr}			I_n		
	R	S	T	R	S	T		R	S	T	R	S	T
1	2,60	1,60	5,48	8,83	3,38	26,0	4,54	0,29 I_{inr}	0,47 I_{inr}	0,21 I_{inr}	0,57 I_n	0,35 I_n	1,21 I_n
2	3,06	1,78	4,56	8,83	3,38	26,0	4,54	0,35 I_{inr}	0,53 I_{inr}	0,18 I_{inr}	0,67 I_n	0,39 I_n	1,00 I_n
3	2,66	1,49	5,52	8,83	3,38	26,0	4,54	0,30 I_{inr}	0,44 I_{inr}	0,21 I_{inr}	0,59 I_n	0,33 I_n	1,22 I_n
4	2,73	1,52	5,50	8,83	3,38	26,0	4,54	0,31 I_{inr}	0,45 I_{inr}	0,21 I_{inr}	0,60 I_n	0,33 I_n	1,21 I_n
5	2,68	1,55	4,49	8,83	3,38	26,0	4,54	0,30 I_{inr}	0,46 I_{inr}	0,17 I_{inr}	0,59 I_n	0,34 I_n	0,99 I_n

Tabel 4.8 Hasil pengukuran arus *inrush* pengujian 1 sudut penyalan 90 derajat secara non-skuensial

Percobaan ke	<i>Inrush Peak</i> Dengan Fluks Residu			Rata-Rata Pengujian <i>Inrush Peak</i> Tanpa Injeksi Fluks Residu (I_{inr})			Arus Nominal (I_n)	Persentase <i>Inrush Peak</i> Dengan Fluks Residu Terhadap I_{inr} dan I_n					
								I_{inr}			I_n		
	R	S	T	R	S	T		R	S	T	R	S	T
1	1,60	1,20	0,48	7,49	4,15	1,53	4,54	0,21 I_{inr}	0,29 I_{inr}	0,31 I_{inr}	0,35 I_n	0,26 I_n	0,11 I_n
2	1,76	1,28	0,56	7,49	4,15	1,53	4,54	0,23 I_{inr}	0,31 I_{inr}	0,37 I_{inr}	0,39 I_n	0,28 I_n	0,12 I_n
3	1,66	1,19	0,52	7,49	4,15	1,53	4,54	0,22 I_{inr}	0,29 I_{inr}	0,34 I_{inr}	0,37 I_n	0,26 I_n	0,11 I_n
4	1,73	1,22	0,50	7,49	4,15	1,53	4,54	0,23 I_{inr}	0,29 I_{inr}	0,33 I_{inr}	0,38 I_n	0,27 I_n	0,11 I_n
5	1,68	1,25	0,49	7,49	4,15	1,53	4,54	0,22 I_{inr}	0,30 I_{inr}	0,32 I_{inr}	0,37 I_n	0,28 I_n	0,11 I_n

Tabel 4.9 Hasil pengukuran arus *inrush* pengujian 2 sudut penyalan 0 derajat secara skuensial

Percobaan ke	<i>Inrush Peak</i> Dengan Fluks Residu			Rata-Rata Pengujian <i>Inrush Peak</i> Tanpa Injeksi Fluks Residu (I_{inr})			Arus Nominal (I_n)	Persentase <i>Inrush Peak</i> Dengan Fluks Residu Terhadap I_{inr} dan I_n					
	R	S	T	R	S	T		I_{inr}			I_n		
								R	S	T	R	S	T
1	2,55	1,31	1,38	3,61	1,84	1,10	4,54	0,70 I_{inr}	0,71 I_{inr}	1,25 I_{inr}	0,56 I_n	0,28 I_n	0,30 I_n
2	1,93	1,30	1,03	3,61	1,84	1,10	4,54	0,53 I_{inr}	0,70 I_{inr}	0,93 I_{inr}	0,42 I_n	0,28 I_n	0,22 I_n
3	2,35	1,29	1,31	3,61	1,84	1,10	4,54	0,65 I_{inr}	0,70 I_{inr}	1,19 I_{inr}	0,51 I_n	0,28 I_n	0,28 I_n
4	1,97	1,32	1,19	3,61	1,84	1,10	4,54	0,54 I_{inr}	0,71 I_{inr}	1,08 I_{inr}	0,43 I_n	0,29 I_n	0,26 I_n
5	2,21	1,29	1,25	3,61	1,84	1,10	4,54	0,61 I_{inr}	0,70 I_{inr}	1,13 I_{inr}	0,48 I_n	0,28 I_n	0,27 I_n

Tabel 4.10 Hasil pengukuran arus *inrush* pengujian 2 sudut penyalan 90 derajat

Percobaan ke	<i>Inrush Peak</i> Dengan Fluks Residu			Rata-Rata Pengujian <i>Inrush Peak</i> Tanpa Injeksi Fluks Residu (I_{inr})			Arus Nominal (I_n)	Persentase <i>Inrush Peak</i> Dengan Fluks Residu Terhadap I_{inr} dan I_n					
								I_{inr}			I_n		
	R	S	T	R	S	T		R	S	T	R	S	T
1	1,43	1,56	4,16	1,39	1,67	5,77	4,54	1,02 I_{inr}	0,93 I_{inr}	0,72 I_{inr}	0,31 I_n	0,34 I_n	0,91 I_n
2	1,38	1,47	4,13	1,39	1,67	5,77	4,54	0,99 I_{inr}	0,88 I_{inr}	0,71 I_{inr}	0,30 I_n	0,32 I_n	0,90 I_n
3	1,36	1,53	4,17	1,39	1,67	5,77	4,54	0,97 I_{inr}	0,91 I_{inr}	0,72 I_{inr}	0,29 I_n	0,33 I_n	0,91 I_n
4	1,41	1,52	4,13	1,39	1,67	5,77	4,54	1,01 I_{inr}	0,91 I_{inr}	0,71 I_{inr}	0,31 I_n	0,33 I_n	0,90 I_n
5	1,46	1,58	4,21	1,39	1,67	5,77	4,54	1,05 I_{inr}	0,94 I_{inr}	0,72 I_{inr}	0,32 I_n	0,34 I_n	0,92 I_n

Tabel 4.11 Hasil pengukuran arus *inrush* pengujian 3 sudut penyalaaan 0 derajat secara skuensial

Percobaan ke	<i>Inrush Peak</i> Dengan Fluks Residu			Rata-Rata Pengujian <i>Inrush Peak</i> Tanpa Injeksi Fluks Residu (I_{inr})			Arus Nominal (I_n)	Persentase <i>Inrush Peak</i> Dengan Fluks Residu Terhadap I_{inr} dan I_n					
								I_{inr}			I_n		
	R	S	T	R	S	T		R	S	T	R	S	T
1	3,68	1,88	1,33	3,61	1,84	1,10	4,54	1,01 I_{inr}	1,02 I_{inr}	1,20 I_{inr}	0,81 I_n	0,41 I_n	0,29 I_n
2	3,52	1,79	0,97	3,61	1,84	1,10	4,54	0,97 I_{inr}	0,97 I_{inr}	0,88 I_{inr}	0,77 I_n	0,39 I_n	0,21 I_n
3	3,58	1,82	1,10	3,61	1,84	1,10	4,54	0,99 I_{inr}	0,98 I_{inr}	1,00 I_{inr}	0,78 I_n	0,40 I_n	0,24 I_n
4	3,48	1,86	0,81	3,61	1,84	1,10	4,54	0,96 I_{inr}	1,01 I_{inr}	0,73 I_{inr}	0,76 I_n	0,40 I_n	0,17 I_n
5	3,63	1,81	1,13	3,61	1,84	1,10	4,54	1,00 I_{inr}	0,98 I_{inr}	1,02 I_{inr}	0,79 I_n	0,39 I_n	0,24 I_n

Tabel 4.12 Hasil pengukuran arus *inrush* pengujian 3 sudut penyalaaan 90 derajat secara skuensial

Percobaan ke	Inrush Peak Dengan Fluks Residu			Rata-Rata Pengujian <i>Inrush Peak</i> Tanpa Injeksi Fluks Residu (I_{inr})			Arus Nominal (I_n)	Persentase <i>Inrush Peak</i> Dengan Fluks Residu Terhadap I_{inr} dan I_n					
								I_{inr}			I_n		
	R	S	T	R	S	T		R	S	T	R	S	T
1	1,42	1,76	5,62	1,39	1,67	5,77	4,54	1,02 I_{inr}	1,05 I_{inr}	0,97 I_{inr}	0,31 I_n	0,38 I_n	1,23 I_n
2	1,37	1,62	6,20	1,39	1,67	5,77	4,54	0,98 I_{inr}	0,97 I_{inr}	1,07 I_{inr}	0,30 I_n	0,35 I_n	1,36 I_n
3	1,41	1,73	5,36	1,39	1,67	5,77	4,54	1,01 I_{inr}	1,03 I_{inr}	0,92 I_{inr}	0,31 I_n	0,38 I_n	1,18 I_n
4	1,39	1,67	5,87	1,39	1,67	5,77	4,54	1,00 I_{inr}	1,00 I_{inr}	1,01 I_{inr}	0,30 I_n	0,36 I_n	1,29 I_n
5	1,36	1,60	5,93	1,39	1,67	5,77	4,54	0,97 I_{inr}	0,95 I_{inr}	1,02 I_{inr}	0,31 I_n	0,35 I_n	1,30 I_n

Tabel 4.13 Hasil pengukuran arus *inrush* pengujian 3 sudut penyalaaan 0 derajat secara non-skuensial

Percobaan ke	Inrush Peak Dengan Fluks Residu			Rata-Rata Pengujian Inrush Peak Tanpa Injeksi Fluks Residu (I_{inr})			Arus Nominal (I_n)	Persentase Inrush Peak Dengan Fluks Residu Terhadap I_{inr} dan I_n					
								I_{inr}			I_n		
	R	S	T	R	S	T		R	S	T	R	S	T
1	6,40	3,08	18,2	8,83	3,38	26,0	4,54	0,72 I_{inr}	0,91 I_{inr}	0,70 I_{inr}	1,41 I_n	0,68 I_n	4,01 I_n
2	7,21	1,68	19,0	8,83	3,38	26,0	4,54	0,82 I_{inr}	0,50 I_{inr}	0,73 I_{inr}	1,59 I_n	0,37 I_n	4,19 I_n
3	5,89	2,62	17,8	8,83	3,38	26,0	4,54	0,67 I_{inr}	0,78 I_{inr}	0,68 I_{inr}	1,30 I_n	0,58 I_n	3,92 I_n
4	6,37	3,42	18,4	8,83	3,38	26,0	4,54	0,72 I_{inr}	1,01 I_{inr}	0,71 I_{inr}	1,40 I_n	0,75 I_n	4,05 I_n
5	6,91	2,74	19,0	8,83	3,38	26,0	4,54	0,78 I_{inr}	0,81 I_{inr}	0,73 I_{inr}	1,52 I_n	0,60 I_n	4,19 I_n

Tabel 4.14 Hasil pengukuran arus *inrush* pengujian 3 sudut penyalaaan 90 derajat secara non-skuensial

Percobaan ke	Inrush Peak Dengan Fluks Residu			Rata-Rata Pengujian Inrush Peak Tanpa Injeksi Fluks Residu (I_{inr})			Arus Nominal (I_n)	Persentase Inrush Peak Dengan Fluks Residu Terhadap I_{inr} dan I_n					
								I_{inr}			I_n		
	R	S	T	R	S	T		R	S	T	R	S	T
1	5,2	2,6	0,86	7,49	4,15	1,53	4,54	0,69 I_{inr}	0,63 I_{inr}	0,56 I_{inr}	1,15 I_n	0,57 I_n	0,19 I_n
2	6,8	3,6	1,23	7,49	4,15	1,53	4,54	0,91 I_{inr}	0,87 I_{inr}	0,80 I_{inr}	1,50 I_n	0,79 I_n	0,27 I_n
3	6,3	2,8	0,98	7,49	4,15	1,53	4,54	0,84 I_{inr}	0,67 I_{inr}	0,64 I_{inr}	1,39 I_n	0,62 I_n	0,22 I_n
4	5,9	3,9	1,03	7,49	4,15	1,53	4,54	0,79 I_{inr}	0,94 I_{inr}	0,67 I_{inr}	1,30 I_n	0,86 I_n	0,23 I_n
5	6,1	3,4	1,18	7,49	4,15	1,53	4,54	0,81 I_{inr}	0,82 I_{inr}	0,77 I_{inr}	1,34 I_n	0,75 I_n	0,26 I_n

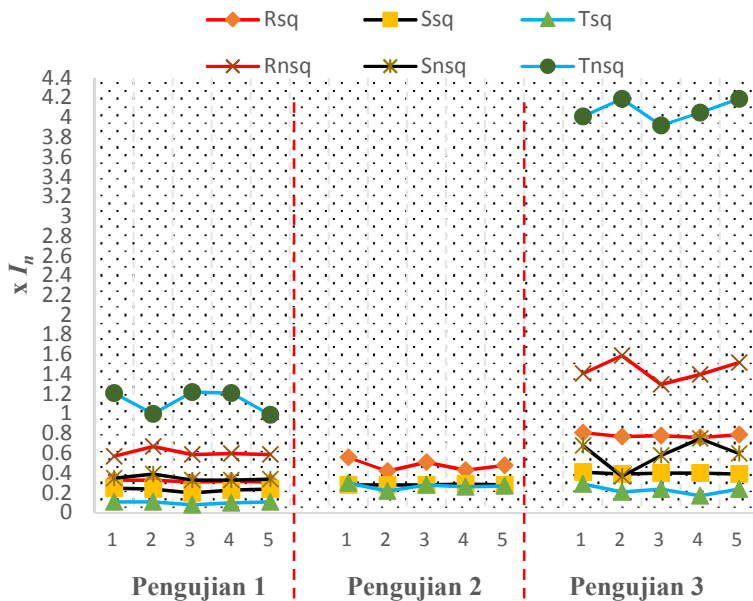
4.4 Analisa Data

Seluruh hasil pengujian pada saat akusisi data digunakan untuk mengetahui karakteristik arus *inrush* saat terdapat *residual fluks* pada transformator uji. Analisa data transformator uji akan dilakukan dengan cara membandingkan antara nilai arus *inrush* ketiga fasa transformator dengan arus nominal transformator bekerja secara maksimal (I_n) dan nilai arus *inrush* ketiga fasa transformator dengan nilai rata – rata arus *inrush* ketiga fasa transformator tanpa *residual fluks* (I_{irr}), baik pada sudut penyalan 0 derajat maupun sudut penyalan 90 derajat dan secara skuensial ataupun non-skuensial.

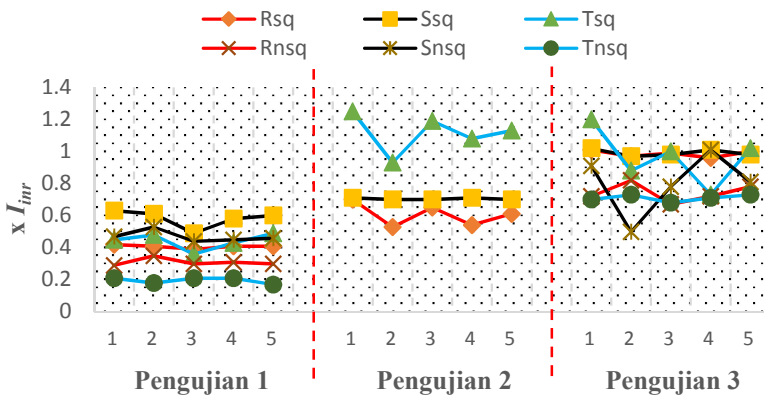
4.4.1 Analisa Data Sudut Penyalan 0 Derajat

Hasil pengujian dalam bentuk grafik pada proses akusisi data yang dilakukan sebanyak lima kali percobaan untuk setiap pengondisian pengujian pada sudut penyalan 0 derajat, di paparkan pada gambar 4.25 dan gambar 4.26. Grafik pada gambar 4.25 merupakan rasio perbandingan antara arus *inrush peak* di setiap fasa dengan nilai arus nominal transformator saat kondisi bekerja secara maksimal, nilai arus nominal tersebut di dapat dengan cara membagi kapasitas daya transformator uji dengan tiga kali sumber tegangan 220 VAC. Sedangkan grafik pada gambar 4.26 merupakan rasio perbandingan antara arus *inrush peak* di setiap fasa dengan nilai rata – rata arus *inrush peak* di setiap fasa tanpa residual fluks pada transformator uji.

Apabila dilihat dari grafik pada gambar 4.25 nilai arus *inrush peak* di setiap pengujian mengalami kenaikan, pada saat pengujian 1 arus *inrush* tidak mengalami banyak kenaikan di karenakan masih ada sisa *residual fluks* atau arus magnetisasi pada transformator uji. Sehingga saat dilakukan *energized* pada transformator, transformator tidak memerlukan banyak arus penyalan untuk proses magnetisasi yang membangkitkan induksi pada sisi lilitan skunder. Sedangkan pada pengujian 2 dan pengujian 3, sudah terdapat proses demagnetisasi pada setiap proses pengujian, sehingga penyalan transformator memerlukan banyak arus untuk membangkitkan induksi, yang akibatnya arus *inrush peak* saat penyalan transformator juga semakin tinggi



Gambar 4.25 Perbandingan rasio arus *inrush peak* dengan nilai arus nominal transformator uji (I_n) sudut penyalan 0 derajat



Gambar 4.26 Perbandingan rasio arus *inrush peak* dengan nilai arus rata – rata arus *inrush peak* tanpa residual fluks pada transformator uji (I_{inr}) sudut penyalan 0 derajat

Kenaikan rasio arus *inrush peak* pada setiap pengujian terhadap nilai nominal arus transformator uji (I_n) pada sudut penyalan skuensial untuk fasa R sebesar $0,31 I_n - 0,81 I_n$, fasa S sebesar $0,20 I_n - 0,41 I_n$, fasa T sebesar $0,08 I_n - 0,30 I_n$. Sedangkan pada sudut penyalan non-skuensial untuk fasa R sebesar $0,57 I_n - 1,59 I_n$, fasa S sebesar $0,33 I_n - 0,75 I_n$, fasa T sebesar $0,99 I_n - 4,19 I_n$. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan sudut penyalan 0 derajat secara skuensial dapat menurunkan arus *inrush* pada transformator uji.

Jika melihat grafik pada gambar 4.26 nilai arus *inrush peak* di setiap pengujian mengalami kenaikan, walaupun pada pengujian 2 dan 3 kenaikan nilai arus *inrush peak* fasa T tidak stabil seperti fasa R atau fasa T. Pada pengujian 1 yang dilakukan tanpa proses demagnetisasi menyebabkan arus *inrush* tidak mengalami banyak kenaikan, hal tersebut di karenakan masih ada sisa *residual fluks* atau arus magnetisasi pada transformator uji. Sedangkan pada pengujian 2 dan pengujian 3, sudah terdapat proses demagnetisasi pada setiap proses pengujian, sehingga arus *inrush peak* saat penyalan transformator juga semakin tinggi. Nilai arus *inrush peak* pada pengujian 3 jika dibandingkan dengan nilai rata – rata pengujian arus *inrush peak* tanpa injeksi fluks residu (I_{inr}), nilainya hanya sedikit di bawah nilai rata – rata pengujian arus *inrush peak* tanpa fluks residu, yang artinya bahwa kondisi fluks sisa pada inti transformator semakin berkurang karena adanya proses demagnetisasi.

Dengan memperhatikan waktu demagnetisasi pada setiap pengujian 1, pengujian 2, atau pengujian 3, dan grafik rasio perbandingan arus *inrush* dengan I_{inr} , dapat di simpulkan bahwa nilai arus *inrush peak* berbanding lurus dengan waktu demagnetisasi. Jadi semakin lama waktu demagnetisasi maka sisa fluks pada transformator semakin berkurang dan ketika sisa fluks pada transformator berkurang atau hilang, maka arus *inrush* sebagai arus magnetisasi transformator yang nilainya semakin mendekati nilai rata – rata pengujian arus *inrush peak* tanpa *residual fluks*.

Kenaikan rasio arus *inrush peak* pada setiap pengujian terhadap nilai rata – rata pengujian arus *inrush peak* tanpa injeksi fluks residu (I_{inr}) transformator uji pada sudut penyalan secara skuensial untuk fasa R sebesar $0,39 I_{inr} - 1,01 I_{inr}$, fasa S sebesar $0,49 I_{inr} - 1,02 I_{inr}$, fasa T sebesar $0,43 I_{inr} - 1,25 I_{inr}$. Sedangkan pada sudut penyalan secara non-

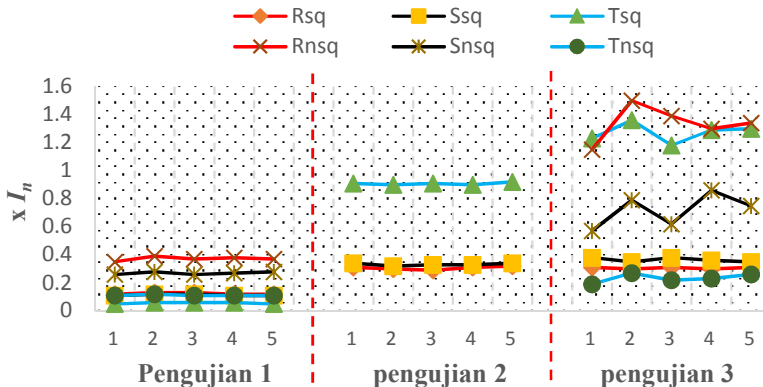
skuensial untuk fasa R sebesar $0,29 I_{inr} - 0,82 I_{inr}$, fasa S sebesar $0,44 I_{inr} - 1,01 I_{inr}$, fasa T sebesar $0,17 I_{inr} - 0,73 I_{inr}$.

4.4.2 Analisa Data Sudut Penyalaan 90 Derajat

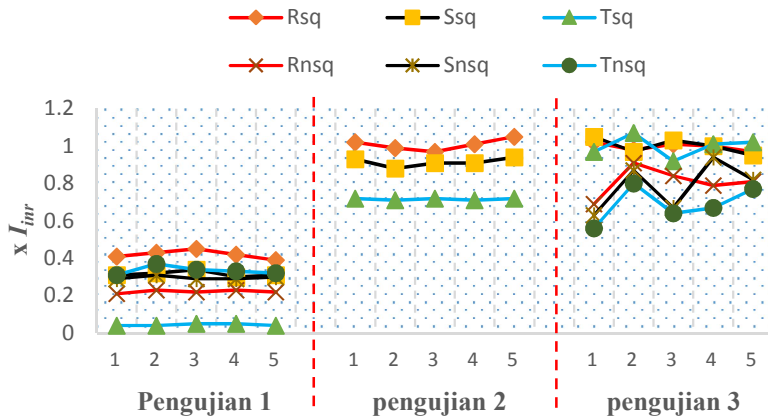
Hasil pengujian dalam bentuk grafik pada proses akusisi data yang dilakukan sebanyak lima kali percobaan untuk setiap pengondisian pengujian pada sudut penyalaan 90 derajat, di paparkan pada gambar 4.27 dan gambar 4.28. Dengan mengamati respon arus *inrush peak* terhadap arus nominal transformator bekerja secara maksimal (I_n) dan nilai arus *inrush* ketiga fasa transformator dengan nilai rata – rata arus *inrush* ketiga fasa transformator tanpa *residual fluks* (I_{inr}), maka karekteristik arus *inrush* transformator uji tanpa beban dapat diketahui.

Grafik pada gambar 4.27 merupakan rasio perbandingan antara arus *inrush peak* di setiap fasa dengan nilai arus nominal transformator saat kondisi bekerja secara maksimal, nilai arus nominal tersebut di dapat dengan cara membagi kapasitas daya transformator uji dengan tiga kali sumber tegangan 220 VAC.

Sedangkan grafik pada gambar 4.28 merupakan rasio perbandingan antara arus *inrush peak* di setiap fasa dengan nilai rata – rata arus *inrush peak* di setiap fasa tanpa residual fluks pada transformator uji.



Gambar 4.27 Perbandingan rasio arus *inrush peak* dengan nilai arus nominal transformator uji (I_n) sudut penyalaan 90 derajat



Gambar 4.28 Perbandingan rasio arus *inrush peak* dengan nilai arus rata – rata arus *inrush peak* tanpa residual fluks pada transformator uji (I_{inr}) sudut penyalan 90 derajat

Apabila dilihat dari grafik pada gambar 4.27 nilai arus *inrush peak* di setiap pengujian cenderung mengalami kenaikan, pada saat pengujian 1 arus *inrush* tidak mengalami banyak kenaikan di karenakan masih ada sisa *residual fluks* atau arus magnetisasi pada transformator uji. Sehingga saat dilakukan *energized* pada transformator, transformator tidak memerlukan banyak arus penyalan untuk proses magnetisasi yang membangkitkan induksi pada sisi lilitan skunder. Sedangkan pada pengujian 2 dan pengujian 3, sudah terdapat proses demagnetisasi pada setiap proses pengujian, sehingga penyalan transformator memerlukan banyak arus untuk membangkitkan induksi, yang akibatnya arus *inrush peak* saat penyalan transformator juga semakin tinggi. Kenaikan rasio arus *inrush peak* pada setiap pengujian terhadap nilai nominal arus transformator uji (I_n) pada sudut penyalan secara skuensial untuk fasa R sebesar $0,12 I_n - 0,32 I_n$, fasa S sebesar $0,11 I_n - 0,38 I_n$, fasa T sebesar $1,18 I_n - 1,36 I_n$. Sedangkan pada sudut penyalan secara non-skuensial untuk fasa R sebesar $0,35 I_n - 1,50 I_n$, fasa S sebesar $0,26 I_n - 0,86 I_n$, fasa T sebesar $0,19 I_n - 0,27 I_n$. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan sudut penyalan 90 derajat secara skuensial dapat menurunkan arus *inrush* pada transformator uji.

Walaupun jika di bandingkan dengan nilai arus *inrush peak* sudut penyalan 0 derajat, nilai arus *inrush peak* ketika sudut penyalan dirubah menjadi 90 derajat menjadi lebih kecil, akan tetapi terdapat beberapa perbedaan bentuk gelombang arus *inrush peak*. Jika pada sudut penyalan 90 derajat secara skuensial, arus *inrush peak* cenderung ke sisi arus polaritas negatif pada sisi fasa R dan fasa S, sedangkan pada sisi fasa T arus *inrush peak* cenderung ke sisi arus polaritas positif.

Hal tersebut dapat disebabkan karena pada saat sudut penyalan 90 derajat di siklus tegangan polaritas positif, arus *inrush* yang masuk ke transformator belum cukup untuk memenuhi arus nominal magnetisasi. Sehingga ketika di siklus tegangan polaritas negatif yang dapat mengisi arus magnetisasi dari sudut 0 derajat, arus magnetisasi dapat terserap lebih banyak. Tetapi arus *inrush peak* yang terserap di siklus polaritas negatif pada sudut penyalan 90 derajat nilainya tidak akan setinggi seperti arus *inrush peak* siklus polaritas positif pada saat sudut penyalan 0 derajat, karena ketika sudut penyalan 90 derajat dimulai, di siklus tegangan polaritas positif sudah terjadi pengisian arus magnetisasi walaupun hanya sedikit. Berbeda dengan sudut penyalan 90 derajat secara non-skuensial, arus *inrush peak* cenderung ke sisi arus polaritas Positif pada sisi fasa S dan fasa T, sedangkan pada sisi fasa R arus *inrush peak* cenderung ke sisi arus polaritas negatif.

Sebab lain yang mengakibatkan perbedaan arah arus siklus positif maupun negatif, pada sudut penyalan skuensial ataupun non-skuensial dapat diakrenakan pada tranaformator uji 3 fasa arus yang mengalir merupakan resultan dari 3 belitan di dalam inti transformator yang sama, selain itu persebaran fluks pada inti transformator 3 fasa yang kurang merata dapat mengakibatkan arus *inrush* pada sudut penyalan 90 derajat terjadi perbedaan arah arus *inrush*.

Jika melihat grafik pada gambar 4.28 nilai arus *inrush peak* di setiap pengujian cenderung mengalami kenaikan. Pada pengujian 1 yang dilakukan tanpa proses demagnetisasi menyebabkan arus *inrush* tidak menglami banyak kenaikan, hal tersebut juga di karenakan masih ada sisa *residual fluks* atau arus magnetisasi pada transformator uji. Sedangkan pada pengujian 2 dan pengujian 3, sudah terdapat proses demagnetisasi pada setiap proses pengujian, sehingga arus *inrush peak* saat penyalan transformator juga semakin tinggi. Nilai arus *inrush peak* pada pengujian

3 jika dibandingkan dengan nilai rata – rata pengujian arus *inrush peak* tanpa injeksi fluks residu (I_{inr}), nilainya hanya sedikit di bawah nilai rata – rata pengujian arus *inrush peak* tanpa fluks residu.

Kenaikan rasio arus *inrush peak* pada setiap pengujian terhadap nilai rata – rata pengujian arus *inrush peak* tanpa injeksi fluks residu (I_{inr}) transformator uji pada sudut penyalaan skuensial untuk fasa R sebesar $0,39 I_{inr} - 1,05 I_{inr}$, fasa S sebesar $0,30 I_{inr} - 1,05 I_{inr}$, fasa T sebesar $0,04 I_{inr} - 1,07 I_{inr}$. Sedangkan pada sudut penyalaan non-skuensial untuk fasa R sebesar $0,21 I_{inr} - 0,91 I_{inr}$, fasa S sebesar $0,29 I_{inr} - 0,94 I_{inr}$, fasa T sebesar $0,31 I_{inr} - 0,80 I_{inr}$.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan pengujian modul demagnetisasi transformator 3kVA 3 fasa untuk mengetahui karakteristik arus *inrush* akibat adanya *residual fluks* dengan metode penyalan skuensial pada sudut 0 derajat dan 90 derajat yang berbasis eksperimen, di dapatkan beberapa kesimpulan, yaitu :

1. Perbandingan rasio kenaikan pada setiap pengujian nilai arus *inrush* ketiga fasa transformator dengan arus nominal transformator bekerja secara maksimal (I_n), hasilnya ketika sudut penyalan 90 derajat secara skuensial rasio kenaikan menjadi lebih kecil dari pada saat sudut penyalan 0 derajat secara skuensial. Rasio perbedaan pada fasa R sebesar 1:2,53 s.d. 1:2,83, fasa S sebesar 1:1,07 s.d. 1:1,81, fasa T sebesar 1:0,83 s.d. 1:1,6.
2. Perbandingan rasio kenaikan pada setiap pengujian nilai arus *inrush* ketiga fasa transformator dengan arus nominal transformator bekerja secara maksimal (I_n), hasilnya ketika sudut penyalan 90 derajat secara non-skuensial rasio kenaikan menjadi lebih kecil dari pada saat sudut penyalan 0 derajat secara non-skuensial. Rasio perbedaan pada fasa R sebesar 1:1,06 s.d. 1:1,62, fasa S sebesar 1:0,87 s.d. 1:1,26, fasa T sebesar 1:9 s.d. 1:15,51.
3. Penurunan arus *inrush* secara non-skuensial dengan skuensial pada sudut penyalan 0 derajat, pada fasa R sebesar 0.26 s.d. 0.78, fasa S sebesar 0.13 s.d. 0.34, fasa T sebesar 0.91 s.d. 3.89
4. Penurunan arus *inrush* secara non-skuensial dengan skuensial pada sudut penyalan 90 derajat, pada fasa R sebesar 0.23 s.d. 1.22, fasa S sebesar 0.15 s.d. 0.48, fasa T sebesar -1.01 s.d. -1.09
5. Dengan melihat rasio penurunan antara metode penyalan secara skuensial dan metode non-skuensial, maka untuk mendapatkan nilai arus *inrush* terkecil saat melakukan *starting* transformator lebih baik menggunakan metode penyalan 90 derajat secara skuensial.
6. Rasio kenaikan pada setiap pengujian nilai arus *inrush* ketiga fasa transformator dengan nilai rata – rata arus *inrush* ketiga fasa transformator tanpa *residual fluks* (I_{inr}) pada metode penyalan skuensial, hasilnya ketika sudut penyalan 0 derajat pada fasa R sebesar 0,39 I_{inr} s.d. 1,01 I_{inr} , fasa S sebesar 0,49 I_{inr} s.d. 1,02 I_{inr} , fasa

T sebesar $0,43 I_{inr}$ s.d. $1,25 I_{inr}$. Sedangkan saat sudut penyalaan 90 derajat untuk fasa R sebesar $0,39 I_{inr}$ s.d. $1,05 I_{inr}$, fasa S sebesar $0,30 I_{inr}$ s.d. $1,05 I_{inr}$, fasa T sebesar $0,04 I_{inr}$ s.d. $1,07 I_{inr}$.

7. Rasio kenaikan pada setiap pengujian nilai arus *inrush* ketiga fasa transformator dengan nilai rata – rata arus *inrush* ketiga fasa transformator tanpa *residual fluks* (I_{inr}) pada metode penyalaan non-skuensial, hasilnya ketika sudut penyalaan 0 derajat pada fasa R sebesar $0,29 I_{inr}$ s.d. $0,82 I_{inr}$, fasa S sebesar $0,44 I_{inr}$ s.d. $1,01 I_{inr}$, fasa T sebesar $0,17 I_{inr}$ s.d. $0,73 I_{inr}$. Sedangkan saat sudut penyalaan 90 derajat untuk fasa R sebesar $0,21 I_{inr}$ s.d. $0,91 I_{inr}$, fasa S sebesar $0,29 I_{inr}$ s.d. $0,94 I_{inr}$, fasa T sebesar $0,31 I_{inr}$ s.d. $0,80 I_{inr}$.
8. Nilai arus *inrush peak* berbanding lurus dengan waktu demagnetisasi, jadi semakin lama waktu demagnetisasi pada transformator uji maka sisa fluks pada transformator semakin berkurang.

5.2 Penelitian Selanjutnya

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengujian fluks residu pada transformator 3 fasa dengan keadaan berbeban atau dengan inti *core* modifikasi.

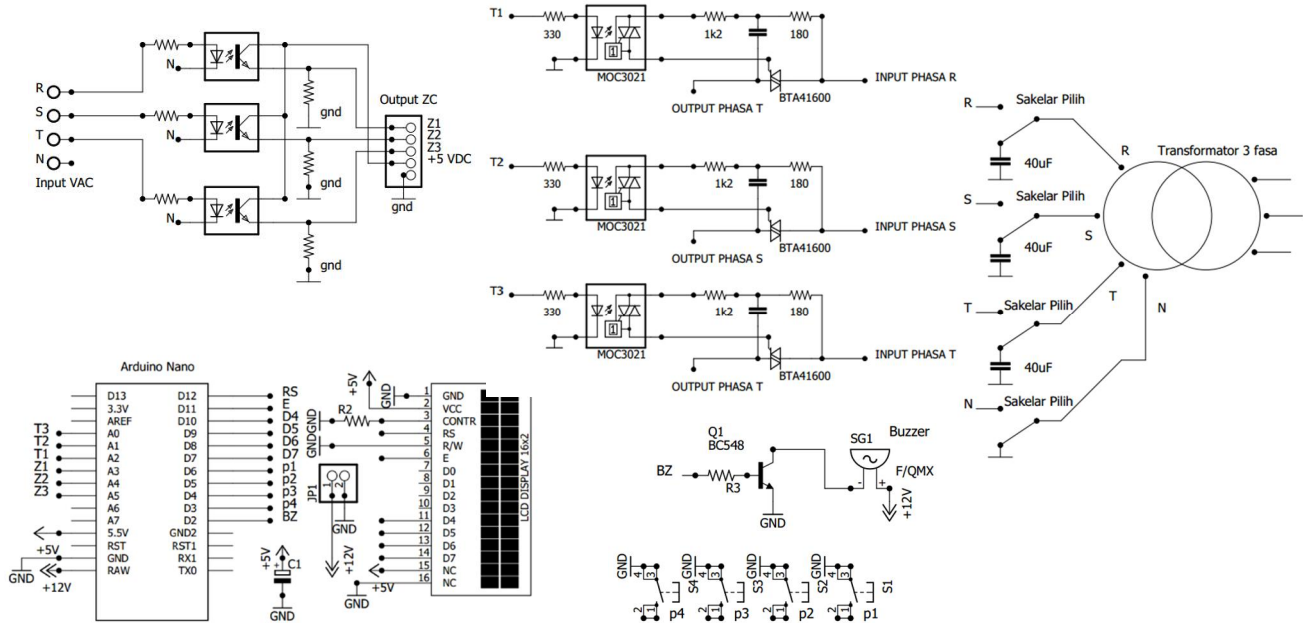
DAFTAR PUSTAKA

- [1] Nicola Chiesa, Power Transformer Modeling for *Inrush* Current Calculation. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology. Jun. 2010.
- [2] M. Steurer and K. Frohlich, “The impact of *Inrush* Currents on the Mechanical stress of High Voltage Power Transformer Coils,” IEEE Trans. Power Del., vol. 17, no. 1, pp. 155–160, Jan. 2002.
- [3] Chapman, Stephen. J. “*Electric Machinery Fundamentals : Fourth Edition*,” McGraw-Hill Education, New York, 2005.
- [4] G. H. Cheng and Z. Xu, “Analysis and Control of Harmonic Overvoltages During Power System Restoration,” in Proc. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005, pp. 1–7.
- [5] R. A. Turner and K. S. Smith, “Resonance Excited by Transformer *Inrush* Current in Inter-connected Offshore Power Systems,” in Proc. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting IAS '08, Oct. 5–9, 2008, pp. 1–7.
- [6] G. Bertagnolli, Short-Circuit Duty of Power Transformers, Second Revised Edition. ABB, 1996.
- [7] T. R. Specht, “Transformer Magnetizing *Inrush* Current,” AIEE Trans, vol. 70, pp. 323–328, 1951.
- [8] J. F. Holcomb, “Distribution transformer magnetizing *inrush* current,” Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part III (Power Apparatus and Systems), vol. 80, no. 57, pp. 697–702, Dec. 1961.
- [9] Reliable Demagnetization of Transformer Cores. “Influence of Residual Magnetism on *Inrush* Current”, OMICRON electronics, 2006.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

LAMPIRAN 1

Rangkaian modul arus *inrush*



[Halaman ini sengaja dikosongkan]